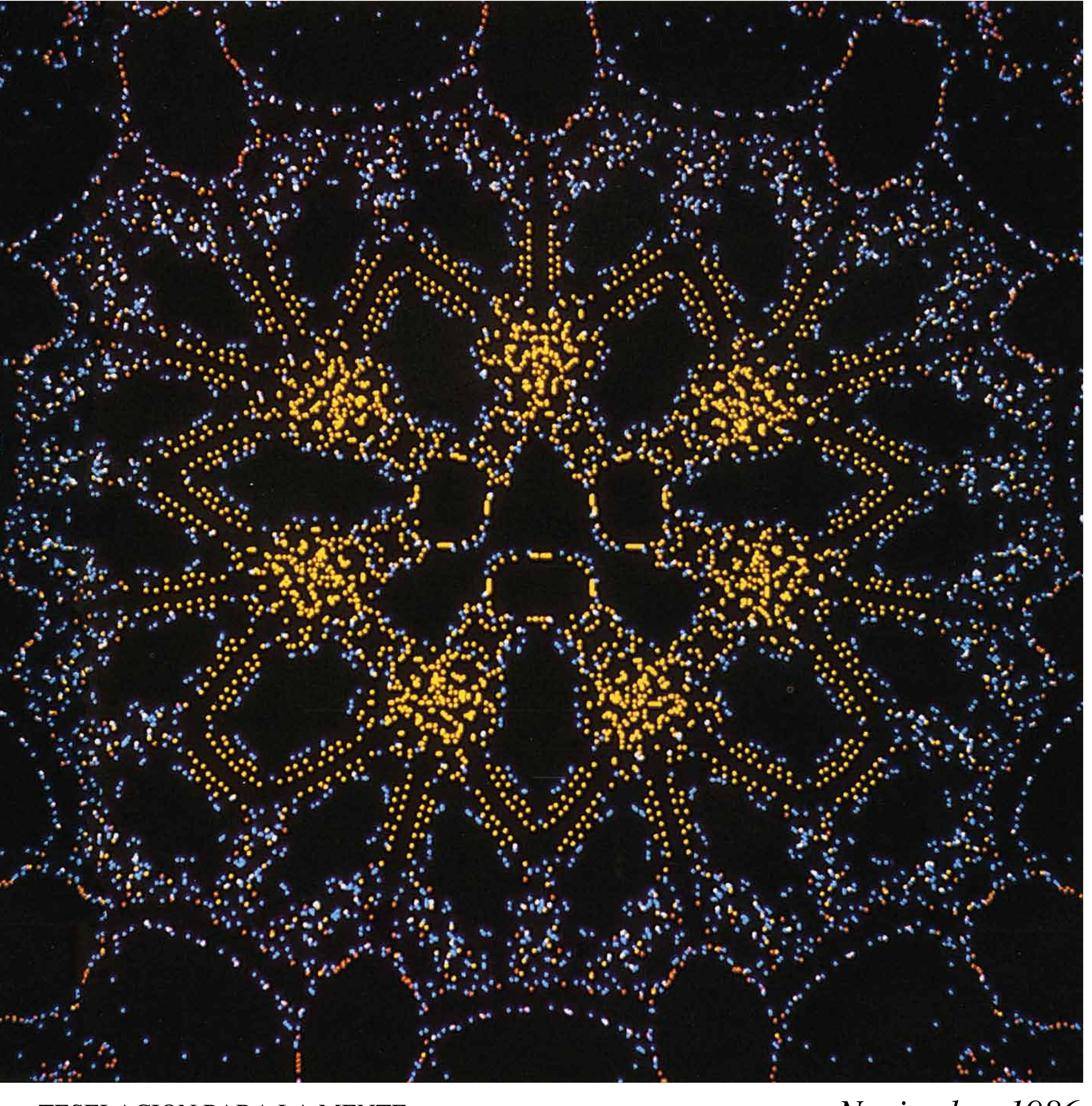
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



TESELACION PARA LA MENTE

Noviembre 1986
450 Ptas.
(IVA incluido)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 122
Noviembre 1986



EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

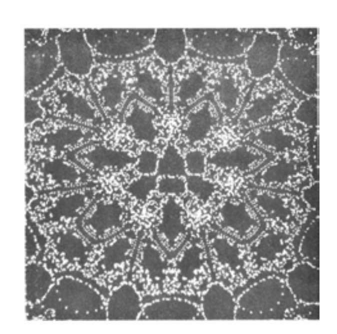
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Amando García Rodríguez: *El problema de las microondas*; Luis F. Errea Ruiz: *De la topología a la química*; Ramón Pascual: *Supercuerdas*; Ana García García: *La barrera hematoencefálica*; Manuel Bandrés Merino: *Los colores de las cosas*; Angel Guerra Sierra: *Braquiópodos*; Leonor Vernet Martínez: *Contribución de Leonardo a la mecánica teórica*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

José María López Piñero, Luis Alonso, Miguel Cordero del Campillo y Jordi Isern



LA PORTADA

La imagen de portada, generada por ordenador, es una gráfica de los sucesivos valores que va tomando una función matemática elemental al aplicarla reiteradamente sobre su propia salida (véase "Juegos de ordenador", por A. K. Dewdney, en este número). La imagen revela parte del potencial creativo de motivos abstractos y no repetitivos que posee un sencillo programa de ordenador. El primero de los puntos dibujados es una "semilla" o "germen", primer valor sobre el que actuará la función, y determina el valor del segundo punto. En este ejemplo, el germen es el origen de coordenadas. El segundo punto determina el tercero, y así sucesivamente, como explica el texto; aquí, los valores de *a*, *b* y *c* son, respectivamente, −0,3, 0,3 y 0,3. La asignación de colores a los puntos se hace de acuerdo con su lugar de orden en la secuencia de trazado. Se han ideado otros sistemas para la generación de imágenes mediante ordenador. La que aquí mostramos es obra de Barry Martin, de la Universidad de Aston, Inglaterra.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.° J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.°, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

La ilustración de la portada es cortesía de Barry Martin, de la Universidad de Aston

Página	Fuente
7	James Kilkelly
8	Edward Bell
9	Alan D. Iselin
10	Haralambos N. Kritikos, Universidad de Pennsylvania
11-14	Alan D. Iselin
17	George Retseck
18-39	Hank Iken, Walken Graphics
47	P.A. Cancilla
48-49	Patricia J. Wynne
50	Thomas S. Reese y Morris J. Karnovsky (*izquierda*), Thomas S. Reese y Milton W. Brightman (*derecha*)
51-53	Patricia J. Wynne
54	Gary W. Goldstein y A. Lorris Betz, Hospital Clínico de la Universidad de Michigan
55	Edward A. Neuwelt
57	Bradford Howland y Denise D. Denton, Instituto de Tecnología de Massachusetts
58	Andrew Christie
60-63	Bradford Howland y Denise D. Denton
67	Organización Europea de Investigaciones Nucleares
68	E. Agazzi, M. Artigas, G. Radnitzky y Magda Màría
69	Luis Puigjaner, Ignacio Fita y Juan A. Subirana
70-73	E. Agazzi, M. Artigas, G. Radnitzky y Magda Màría
77	Doug Allan, Animals Animals (*arriba*); R. J. Hill, Instituto Oceanográfico de Nueva Zelanda (*abajo*)
78-82	Tom Prentiss
85	Pat Canganelli
86	Biblioteca estatal de Baviera, Munich
87-90	Pat Canganelli
93	David Wiseman, Universidad de Ontario Occidental
94-96	Barry Martin, Universidad de Aston
97	Johnny Johnson
98	Tony D. Smith, PICA Pty. Ltd., Essendon, Australia
99	Tony D. Smith, PICA Pty. Ltd., Essendon, Australia
100-105	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

KENNETH R. FOSTER y ARTHUR W. GUY ("El problema de las microondas") se interesan por la interacción entre los campos electromagnéticos y el tejido vivo. Foster se doctoró en física por la Universidad de Indiana en 1971. Comenzó sus investigaciones sobre los efectos biológicos de las microondas durante su servicio militar en la Marina de los Estados Unidos, trabajos que ha proseguido, desde 1976, en el departamento de bioingeniería de la Universidad de Pennsylvania. Hoy enseña bioingeniería y dirige el laboratorio de bioelectromagnetismo de la Universidad de Washington. Desde 1970 hasta 1982 presidió la comisión de la Oficina estadounidense de Pesos y Medidas que redactó las directrices sobre exposición a las microondas.

DENNIS H. ROUVRAY ("De la química a la topología") es investigador adjunto del departamento de química de la Universidad de Georgia. Formado en el Imperial College de Londres, donde estudió química, se interesó por la aplicación a esta ciencia de la topología y la teoría de grafos cuando, en 1970, disfrutaba de un año sabático en el Instituto Matemático de la Universidad de Oxford. La química matemática no constituía a la sazón una disciplina autónoma, mientras que hoy, según informa, se publican anualmente más de 500 trabajos sobre el tema.

MICHAEL B. GREEN ("Supercuerdas") enseña física en el Queen Mary College de la Universidad de Londres. En el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, donde pasó dos años en calidad de becario tras doctorarse (1970) por la Universidad de Cambridge, nació su interés por la teoría de cuerdas. Volvió a Cambridge en 1972 para trabajar en el Cavendish, trasladándose a Oxford, en 1977, y luego a Londres, en 1978. Acude frecuentemente al Instituto de Tecnología de California para trabajar con John H. Schwarz, pionero de dicha teoría.

GARY W. GOLDSTEIN y A. LORRIS BETZ ("La barrera hematoencefálica") iniciaron su colaboración en 1977, trabajando Betz como becario de postdoctorado en el laboratorio de Goldstein, en el Hospital Clínico de la Universidad de California en San Francisco. En 1979 se trasladaron ambos al de la Universidad de Michigan, de cuyos departamentos de pediatría y neurología es Goldstein profesor y, Betz, profesor adjunto. Goldstein cursó estudios de medicina en la Universidad de Chicago; antes de ingresar en el claustro docente de San Francisco (1973) fue residente en varios hospitales clínicos. Betz se licenció en medicina y se doctoró en fisiología y bioquímica por la Universidad de Wisconsin en Madison.

PHILIPPE BROU, THOMAS R. SCIASCIA, LYNETTE LINDEN y JEROME Y. LETTVIN ("Los colores de las cosas") investigan, bajo la dirección de Lettvin, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Brou se recibió de doctor en visión por ordenador por el MIT, en cuyo laboratorio de inteligencia artificial trabaja sobre resolución de problemas de gráficos, análisis financiero, fabricación y prospección petrolífera. Sciascia es neurólogo de plantilla del Hospital de Veteranos de Boston; también enseña neurología en la Facultad de Medicina de la Universidad de esa ciudad. Linden es profesora ayudante de ingeniería de fabricación de la Universidad de Boston. Anteriormente perteneción al claustro de profesores del MIT, habiéndola galardonado ambos centros por sus méritos docentes. El propio Lettvin viene a representar la diversidad de su grupo: licenciado en medicina por la Universidad de Illinois, ejerció de psiquiatra, pero durante los últimos 35 años colabora con el laboratorio de electrónica del MIT y, desde hace 20, ha enseñado tanto en el departamento de biología como en el de ingeniería eléctrica e informática.

EVANDRO AGAZZI, MARIANO ARTIGAS y GERARD RADNITZKY ("La fiabilidad de la ciencia") iniciaron su colaboración en la Academia Internacional de Filosofía de las Ciencias de Bruselas, de la que Agazzi es presidente y Radnitzky es primer asesor. Agazzi nació en 1934. Finalizó sus estudios de filosofía (1957) y física (1961) en Milán. Se especializó en filosofía de la ciencia en Oxford (1961). Es profesor ordinario de esa disciplina en la Universidad de Génova desde 1970 y en la de Friburgo (Suiza) desde 1979. Ha impartido cursos en las Universidades de Düsseldorf, Berna, Pittsburgh y Ginebra. Es secretario de la Federación internacional de las Sociedades de filosofía. Artigas nació en 1938. Se doctoró en física (1968) y en filosofía (1979) en la Universidad de Barcelona, donde ha sido profesor de filosofía de la naturaleza y de epistemología. En 1985 fue profesor invitado en la Universidad de La Sabana de Bogotá. Radnitzky nació en 1921. Estudió filosofía en Estocolmo y se doctoró en Göteborg. Desde 1960 fue profesor en las universidades de Göteborg y Bochum. Desde 1976 es profesor de filosofía de la ciencia en la Universidad de Tréveris. Profesor invitado en la Universidad estatal de Nueva York y en la Sociedad japonesa para la promoción de la ciencia, ha estudiado de modo particular la metodología de la investigación. En 1974 fue elegido miembro de la Sociedad Británica para la filosofía de la ciencia.

JOYCE R. RICHARDSON ("Braquiópodos") se interesó por los braquiópodos durante su estancia en el Instituto Oceanográfico de Nueva Zelanda. "El especial atractivo de los braquiópodos", comenta la autora, "reside en que proporcionan el mejor registro (en persistencia, continuidad, abundancia y detalle) de la vida sobre la tierra". En la actualidad ocupa plaza de especialista del Museo Victoria, de Melbourne. Se licenció en zoología por la Universidad de Nueva Zelanda y se doctoró en geología por la de Melbourne.

VERNARD FOLEY y WERNER SOEDEL ("Contribución de Leonardo a la mecánica teórica") han aunado a menudo su dispar formación académica en el estudio de temas de historia de la técnica. Foley es profesor adjunto de historia y Soedel enseña ingeniería mecánica, ambos en la Universidad de Purdue. No constituye ésta su primera contribución en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; de esos autores han aparecido ya "Catapultas antiguas" (mayo de 1979), "Naves de guerra a remo en la antigüedad" (junio de 1981) y "La ballesta" (marzo de 1985). Foley, doctor en historia por la Universidad de California en Berkeley, es especialista en historia de la ciencia y la técnica. Soedel, nacido en Praga en el seno de una familia de la minoría alemana de los Sudetes, fue expulsado a Alemania en 1945, donde se licenció en ingeniería y trabajó hasta su traslado a Estados Unidos, en 1963.

Hace...

José M.ª López Piñero

...ciento cincuenta años

Nació en Madrid José Eugenio Olavide, figura que encabezó en España la conversión de la dermatología y venereología en una de las más tempranas especialidades médicas. Estudió medicina en la Universidad de Madrid, obteniendo el título de licenciado en 1858. Al año siguiente marchó a París, en varios de cuyos hospitales completó su preparación clínica. En 1860, ya de regreso en Madrid, ganó la plaza de médico del Hospital de San Juan de Dios, que se convirtió gracias a su esfuerzo en el auténtico núcleo de la nueva especialidad en nuestro país. A lo largo de toda su vida, Olavide fue un defensor de los puntos de vista de la escuela dermatológica francesa encabezada por Pierre L. A. Cazenave, M. G. Alphonse Devergie y Pierre A. E. Bazin. En consecuencia, aparte de un excelente observador clínico, fue un entusiasta cultivador de los estudios histopatológicos y parasitológicos. Su primer trabajo histopatológico, dedicado a un lipoma submuscular, apareció en 1859, fecha temprana incluso en un contexto europeo. Durante los años siguientes realizó, además, investigaciones experimentales sobre diversos parásitos microscópicos, en parte en colaboración con el cirujano Federico Rubio. También colaboraron ambos en sus primeras indagaciones bacteriológicas, publicando, por ejemplo, en 1872, un examen de los gérmenes existentes en el vapor atmosférico del servicio hospitalario de Ezequiel Martín de Pedro. El mismo año pronunció Olavide su discurso titulado *El parasitismo o morbilismo vegetal* (1872). En 1881 consiguió que se instalara en el Hospital de San Juan de Dios un laboratorio anatomopatológico y microbiológico.

Olavide fue autor de un número muy elevado de libros, folletos y artículos de revistas. Entre ellos, destaca su gigantesca obra *Dermatología general y clínica iconográfica de enfermedades de la piel o dermatosis* (1871-1873), cuyo segundo volumen es un espléndido atlas de 168 láminas cromolitográficas, que incluyen, junto a la iconografía clínica, numerosas imágenes histopatológicas y parasitológicas. Su producción interesó en otros países europeos.

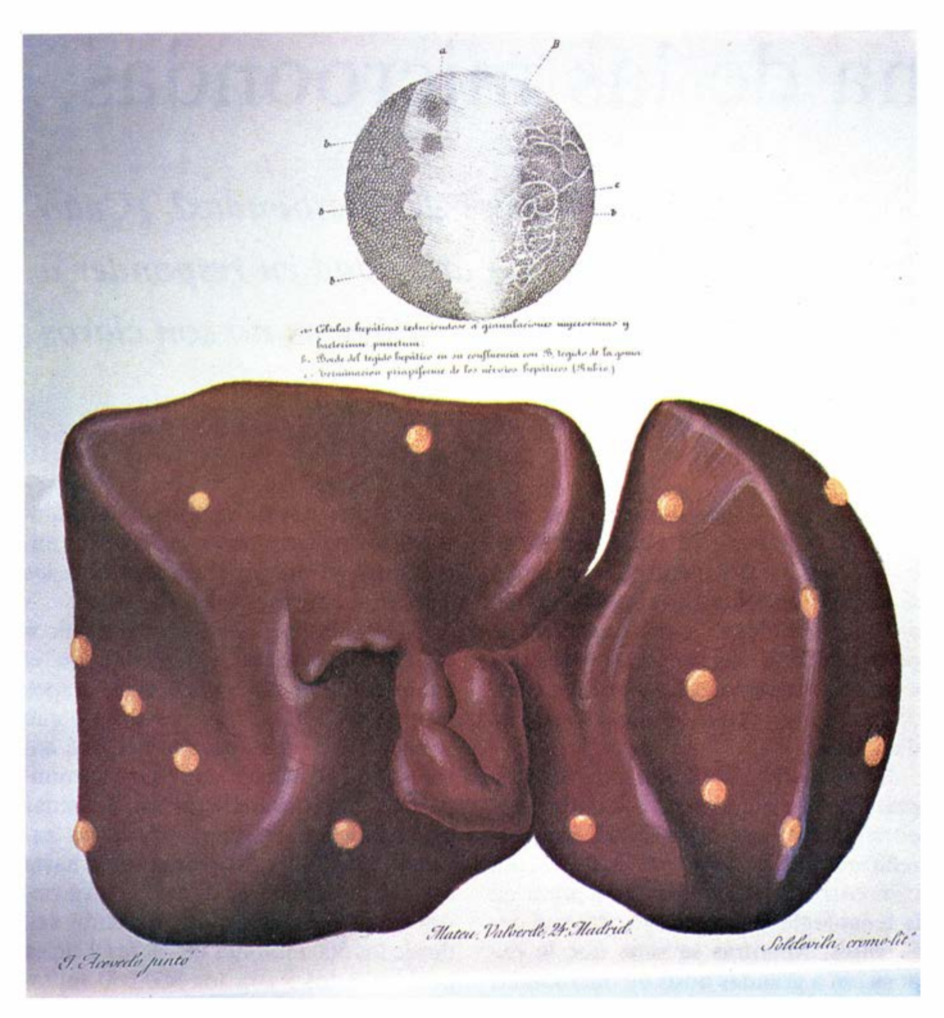
Un ejemplo representativo de la obra de Olavide es el siguiente caso de sífilis visceral, que figura en su *Dermatología general*: "*Observación*. El día primero de diciembre del 71 entró en nuestra enfermería, ocupando la cama núm. 17 de la sala de San Carlos, A. S., natural de Covajos (provincia de Oviedo), de 35 años, sirviente. Anteriormente estuvo también en nuestras salas para tratarse varios accidentes secundarios y terciarios de la sífilis, como fueron una sifílide pústulo crustáceo ulcerosa, exóstosis y periostosis de la tibia izquierda, placas mucosas ulceradas y úlceras secundarias del velo péndulo. Según nos dijo en esta ocasión, databa ya su enfermedad de lo menos diez años, no pudiendo precisar la época de aparición del chancro primitivo con seguridad. Se le trató, como es consiguiente, dándole los mercuriales al interior y después unido al ioduro de potasio (mixtura de ioduro potásico-mercúrico), fricciones mercuriales a la pierna y toques a las úlceras del velo del paladar, con nitrato ácido de mercurio, gargarismo de Ricord. Estuvo tratándose esta vez desde el 3 de agosto, en que entró hasta el 22 de septiembre, en que encontrándose mejor nos pidió el alta, a pesar de que le dijimos que no estaba curado; pero insistió y hubo que concedérsela. Volvió a entrar, como hemos dicho, el primero de enero en este Hospital en un estado lastimoso. Además de los vestigios de la sifílide ulcerosa anterior, nuevas ulceraciones redondeadas, profundas, de color cobrizo, existían en las piernas; los exóstosis de las tibias, sobre todo de la izquierda, eran considerables; el estado general del enfermo era muy poco satisfactorio, estaba demacrado, con pérdida considerable de fuerzas; pero lo que más le molestaba, además de los dolores que sentía en la espina tibial izquierda, era el estado de la garganta, en la que había destrucciones del velo del paladar casi en su mitad; los pilares de éste, sobre todo en el lado derecho, no existían, ocupando su sitio grandes úlceras de un fondo gris pultáceo; la deglución era difícil y además la fonación se hallaba muy alterada, no sólo por la deformación producida por las ulceraciones en la cámara posterior de la boca, sino también el timbre de la voz era más bajo y un poco apagado, denotando que había ya afección laríngea, aunque todavía no había más signos por parte del aparato respiratorio, que no tardaron, sin embargo, en llegar...

"*Autopsia a las veinticuatro horas*. Abierta la cavidad del pecho, cortada y separada la laringe de sus inserciones musculares, se notó: 1.º Destrucción de parte de los cartílagos aritenoideos, gran inyección parcial de la mucosa supra-glótica, ulceraciones en algunos puntos, destrucción parcial de las cuerdas vocales, engrosamiento de la porción infra-glótica. 2.º Placas inyectadas de sangre con la tráquea; también ulceraciones en algunos puntos de su mucosa. 3.º Los pulmones estaban oscuros en su superficie, inyectados, rugosos al

ERRATA

En el número 120 de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, correspondiente al mes de septiembre, fallos de ordenador produjeron los siguientes errores:

	DONDE DICE:	DEBE DECIR:
Página 22, figura 4, línea 13	**rando interacciones distintas. Las otras tres fuerzas permanecieron unificadas.**	**separándose de la fuerza electrodébil (que es combinación de la fuerza nuclear**
Página 24, figura 5, línea 21	**(protosupercúmulos), que después se fragmentaron en estructuras menores. En una variante de este modelo (*c*), las partículas primitivas no son neutrinos, sino ciertas partículas muy masivas predichas en la nueva**	**teoría de la supersimetría. Por ser éstas más lentas (más frías) que los neutrinos, las fluctuaciones podrían formarse antes, y a escalas menores, que en el modelo de neutrinos. A las fluctuaciones de pequeña escala**
Página 25, figura 6, línea 6	**Universidad de Chicago. Estos modelos predicen que la materia se asociaría en**	**nando, en una estructura celular, con vacíos esféricos o elípticos (*derecha*).**
Página 47, columna 1, línea 17	Corteza y manto flotaba en un substrato más pesado,	Corteza y manto En el modelo de isostasia postulado por Airy, la corteza terrestre, liviana, flotaba en un substrato más pesado,



1. Sífilis visceral. Lámina de la Dermatología general *(1871-1873), de José Eugenio Olavide, cuyo segundo volumen es un espléndido atlas iconográfico. Esta cromolitografía ofrece imágenes macro y microscópicas del hígado sifilítico. En la microscópica, debida a la colaboración de Federico Rubio, se esquematiza la zona de confluencia del tejido hepático con el del goma*

tacto y sin crepitación; en su parte posterior se notaban pequeños cuerpos redondeados, desde el tamaño de un grano de mijo a una pequeña lenteja; al corte se ve resistencia en algunos puntos, congestión en otros y hepatización sobre todo en el derecho y parte del izquierdo; además varios cuerpos amarillentos, blandos unos, reblandecidos y supurados otros, redondeados, de color amarillento de garbanzo cocido, blanco al interior; de algunos manaba una materia semi-líquida, ligeramente amarillenta; existía también una caverna del tamaño de una naranja pequeña en el vértice del pulmón izquierdo.

"*Abdomen.* Examinada esta cavidad, nada de particular se observa en la disposición general de los órganos que sea digno de mención: el hígado aumentado de volumen, de color moreno apizarrado en su cara convexa, en vez de rojo-oscuro de su estado normal; su cara cóncava es notable por la multitud de gomas de que está sembrado, embutidas en su superficie, redondeadas, aplastadas a modo de lentejas, de color amarillento perfectamente semejante al garbanzo cocido, variando su tamaño desde un garbanzo grande al de una lenteja, mezcladas con la sustancia del hígado, pero perfectamente aislables; su aspecto en los bordes y en la cara inferior del órgano están perfectamente representados en la lámina; además el interior del hígado y casi toda su sustancia está literalmente sembrada de iguales productos, cuyo interior es blanco, algo duros al corte, demostrando estar todavía en estado de evolución, la vesícula biliar normal; al corte el tejido del hígado es bastante resistente, congestión de los vasos hepáticos, sobre todo el sistema de la vena porta. Riñones algo hipertrofiados, congestionados; tumores gomosos análogos a los del hígado aunque mucho más pequeños; dilatación de los cálices y de la pelvis de estos órganos. Bazo también ligeramente congestionado, algo difluente de sustancia, ligeros puntos pequeños amarillentos, al parecer tumores también gomosos".

El problema de las microondas

¿Constituye un peligro la exposición a bajos niveles de microondas? ¿Cuán estrictos deberían ser los límites de exposición? La dificultad en responder a estas preguntas se debe a que algunos de los efectos biológicos no son claros

Kenneth R. Foster y Arthur W. Guy

Los elementos de control del tráfico aéreo, el radar militar y de la policía, los sistemas de televisión por satélite, los equipos telefónicos para largas distancias, los dispositivos de diatermia utilizados en medicina y los hornos de microondas generan microondas. Excepto en el caso de que éstas se apliquen deliberadamente al cuerpo humano por motivos terapéuticos, la cuantía de esta energía invisible que alcanza al público es pequeña. ¿Representa la exposición a estos bajos niveles de energía de microondas un peligro para la salud humana?

Esta pregunta resulta más fácil de plantear que de contestar. La interacción entre microondas y organismos ha sido estudiada con más profundidad que la mayoría de los otros riesgos ambientales potenciales, y, a pesar de ello, los resultados siguen siendo objeto de controversia científica y debate público.

Los sistemas de comunicaciones constituyen una fuente extendida, aunque extremadamente débil, de exposición del público a las microondas. La controversia suele comenzar cuando una compañía solicita autorización a una autoridad local para instalar una estación de comunicaciones por microondas. El portavoz de la compañía puede explicar que las intensidades transmitidas, o niveles de potencia, serán a lo sumo miles o millones de veces menores que los límites permisibles. A su vez, dichos límites son considerablemente menores que los niveles necesarios para producir algún daño biológico.

Los oponentes contestan entonces que la exposición a niveles bajos de energía de microondas puede presentar algún tipo de peligro desconocido y que su seguridad todavía no ha sido plenamente demostrada. Señalan, además, que son muchos los efectos biológicos sugeridos en un momento u otro (a través de estudios en animales) en relación con la exposición a microondas de baja energía, tales como cambios en el sistema inmunológico, alteraciones en el comportamiento, modificación de la permeabilidad del cerebro a ciertas moléculas transportadas por la sangre, daños en los cromosomas y desarrollo del cáncer.

La controversia perdura debido, en parte, a que algunos de los datos proporcionados por unos 6000 estudios realizados a lo largo de los 40 años transcurridos desde la introducción de la tecnología de las microondas son deficientes. Mientras se sabe que la exposición a grandes dosis de microondas puede producir quemaduras en los tejidos humanos o fatiga por calor, no se ha demostrado la existencia de un límite claro, por encima del cual, la radiación de bajo nivel sobre los seres humanos sea perjudicial. Por otra parte, tampoco se ha demostrado que la exposición a pequeñas dosis de microondas esté exenta de peligros. Esta falta de consenso no obedece sólo a una investigación imperfecta. La causa es de tipo fundamental: el proceso de valoración del riesgo proporciona unos datos que están sujetos a diferentes interpretaciones y esto puede originar controversias, se demuestre o no la existencia de peligro.

En vista de la falta de pruebas concluyentes en los trabajos experimentales publicados hasta el momento, no vamos a discutir aquí si la exposición a la energía de microondas en pequeñas dosis es peligrosa o no. Nos limitaremos a describir los procesos que permiten cuantificar los riesgos conocidos. Vamos a exponer también el contenido de la principal normativa norteamericana para limitar la exposición a las microondas y los criterios en que se basa. A continuación procederemos a revisar algunos casos concretos que nos ayudarán a comprender por qué resulta tan difícil poner de manifiesto los peligros potenciales de las microondas y, en general, de todos los agentes ambientales de bajo nivel.

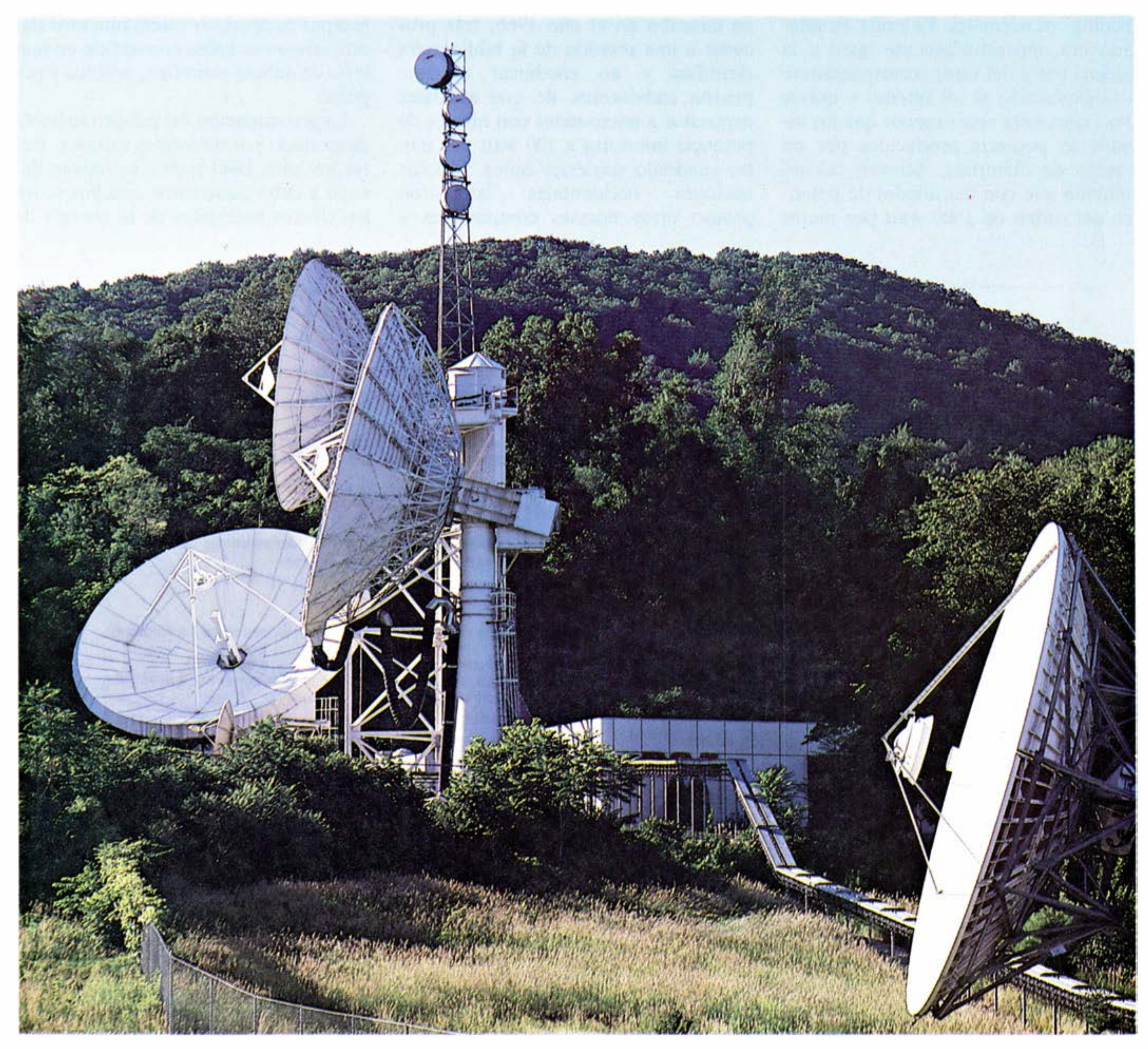
El interés por los efectos biológicos de las microondas se enmarca en el contexto de la experiencia con campos eléctricos de baja frecuencia, a los que se recurrió para su uso tecnológico antes que a las microondas. Las microondas son una parte del espectro de ondas electromagnéticas cuya banda se extiende desde los 300 megahertz hasta los 300 gigahertz; es decir, incluye ondas cuyas frecuencias de oscilación van desde los 300 millones de hertz (o ciclos por segundo) hasta los 300.000 millones de hertz. Estas frecuencias son más elevadas (y, por tanto, las longitudes de onda correspondientes son más bajas) que las señales ordinarias de radio y televisión. En orden creciente de frecuencias, por encima de la banda de las microondas se sitúan la radiación infrarroja, la luz visible y la radiación "ionizante": radiación ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

Deberíamos señalar que la radiación ionizante es cualitativamente muy diferente de la energía de microondas en lo que atañe a sus efectos sobre los sistemas biológicos. Cuando un fotón –o paquete de energía– de una radiación ionizante atraviesa la materia, rompe los enlaces químicos (incluso sin que se produzca un calentamiento apreciable) y da lugar a que las moléculas neutras queden cargadas. Esta ionización puede dañar los tejidos. En comparación, la energía de un fotón de microondas de un gigahertz supone tan sólo la seismilésima parte de la energía cinética que posee una molécula del cuerpo como resultado de la agitación térmica, que ni siquiera es capaz de romper el enlace químico más débil. Este hecho no excluye la posibilidad de que la energía de microondas produzca alteraciones directas en las moléculas de un tejido, pero no sugiere la exis-

tencia de un mecanismo por el que se induzcan cambios significativos en el mismo.

Cuando se introdujo la tecnología de las microondas, durante la segunda guerra mundial (y el uso del radar cambió el curso de la guerra), los campos electromagnéticos de bajas frecuencias habían sido ya utilizados en el calentamiento terapéutico durante gran parte de lo que iba de siglo. Aunque el valor del calentamiento terapéutico no se ponía en cuestión, un peligro potencial consistía evidentemente en las quemaduras u otros daños resultantes de un excesivo calentamiento de los tejidos. Por otra parte, se desencadenó cierta controversia entre los investigadores en relación con la posibilidad de que la energía electromagnética de alta frecuencia fuera capaz de producir efectos biológicos en los organismos, efectos que algunos pensaban que no provenían del mero calentamiento.

En la década siguiente a la segunda guerra mundial la tecnología de las microondas siguió desarrollándose rápidamente, y este progreso motivó una generalización de la exposición del hombre a dicha energía. Aunque el número de daños de cualquier índole reseñados fue escaso, la posibilidad de peligro se hizo más y más preocupante cada día. Como consecuencia del uso generalizado de los equipos de radar de potencia relativamente elevada, los militares tomaron la delantera en la investigación de las microondas, iniciando algunos programas de investigación a principios de los años cincuenta que, tras las oportunas ampliaciones, todavía continúan en la actualidad. A principios de esa misma década, muchos investigadores y organismos gubernamentales empezaron también a considerar la necesidad de establecer algunas normativas relativas a la exposición.



1. ANTENAS (*discos grandes*) de una estación de comunicaciones de Vernon, New Jersey; transmiten señales de microondas a los satélites. Otras antenas (*discos pequeños*) recogen la energía y la envían hasta los receptores terrestres. Las señales sirven para distintos propósitos; entre ellos, las emisiones de televisión por satélite. Las transmisiones procedentes de estas antenas, y las de otras muchas similares que hacen que Vernon sea un nudo de comunicaciones de microondas por satélite, originan niveles de exposición del público muy inferiores a los límites de seguridad impuestos por el Estado. (Los discos del fondo, cuya misión consiste en recibir las transmisiones, no son una fuente de exposición.) Vernon es uno de los lugares de los Estados Unidos en el que grupos de ciudadanos han protestado por la instalación de generadores de microondas, temiendo que la exposición aun a niveles bajos de energía suponga un peligro.

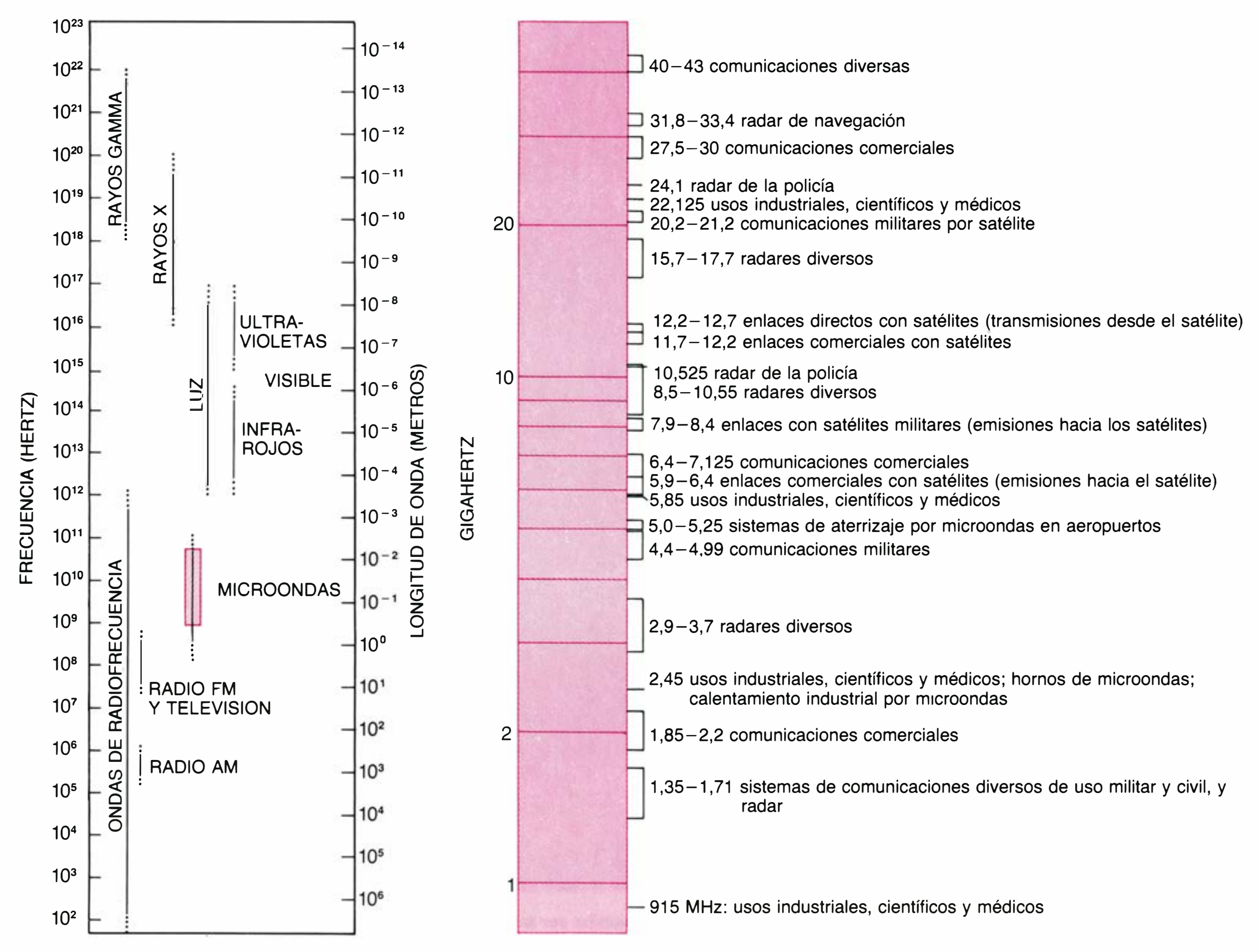
Merece citarse la figura de Herman P. Schwan, de la Universidad de Pennsylvania. Basándose en estimaciones teóricas del calentamiento de los tejidos, en el año 1953 recomendó que la exposición humana a la energía de microondas no superara una "densidad de potencia" media de 100 watt por metro cuadrado.

Los cálculos de Schwan demostraron que una exposición a este nivel de potencia incidente produciría una elevación de la temperatura de cualquier región del cuerpo humano del orden de un grado centígrado o algo menor y generaría calor a una tasa comparable con la del que se origina en los procesos fisiológicos normales. El límite establecido era aproximadamente igual a la décima parte del valor correspondiente a la exposición al sol intenso y quizás unas cincuenta veces menor que los niveles de potencia producidos por un equipo de diatermia. Schwan calculó también que con densidades de potencia del orden de 1000 watt por metro cuadrado el calentamiento resultante podría producir daños al cuerpo en algunas circunstancias. En consecuencia, el límite propuesto permitía un margen de seguridad del orden de 10.

Schwan dirigió su recomendación a la Marina de los Estados Unidos, que había expresado su preocupación en relación con la seguridad de las microondas, y su propuesta fue incorporada a una normativa formal del Instituto de Regulación de los Estados Unidos de América, denominado más tarde American National Standards Institute (ANSI). Este Instituto es una organización privada que recomienda medidas de seguridad de muchas clases para diferentes industrias, y adoptó la norma en cuestión en el año 1966, tras proceder a una revisión de la bibliografía científica y no encontrar ninguna prueba convincente de que animales expuestos a microondas con niveles de potencia inferiores a 100 watt por metro cuadrado sufrieran daños. Muchas naciones occidentales adoptaron pronto otras normas comparables a ésta, y la pauta impuesta por el ANSI (conocida formalmente como Norma ANSI C95.1) se convirtió en la regla más influyente en lo concerniente a la exposición a las microondas de la población y los trabajadores en los Estados Unidos.

La norma ANSI original, que cubría las frecuencias comprendidas entre los 10 megahertz y 100 gigahertz, permaneció sustancialmente inalterada durante muchos años, pero una reconsideración periódica de los patrones del ANSI sugirió, en el año 1982, la introducción de algunos cambios. Por aquel entonces, el tema de la seguridad en la exposición a campos de microondas de bajo nivel –aquellos cuya potencia es incapaz de producir calentamientos significativos– se había convertido en materia de debate científico, político y popular.

La preocupación del público se había despertado por diferentes razones. Entre los años 1940 y 1970 se habían llevado a cabo numerosos estudios sobre los efectos biológicos de la energía de



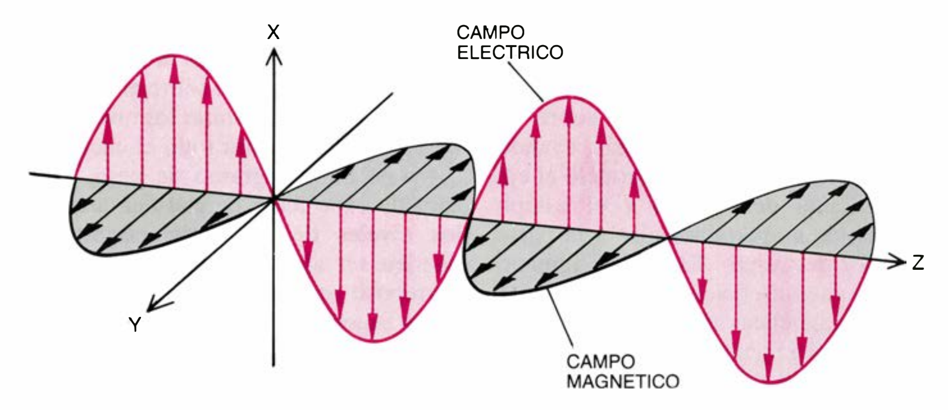
2. BANDA DE MICROONDAS del espectro electromagnético (*izquierda*): se extiende desde los 300 millones hasta los 300.000 millones de hertz. Las microondas se utilizan con profusión para diferentes aplicaciones, algunas de las cuales se relacionan en la derecha de esta figura. Las funciones de comunicación y los radares militares y civiles se concentran en la región comprendida entre 0,3 y 40 gigahertz (1 gigahertz equivale a mil millones de hertz). La medicina, la industria y la ciencia emplean diferentes frecuencias, pero las más utilizadas son de 915 megahertz (1 megahertz equivale a un millón de hertz) y 2,45 gigahertz.

las microondas. La mayoría de los efectos encontrados tenían lugar para densidades de potencia superiores a los 100 watt por metro cuadrado; sin embargo, también se había puesto de manifiesto algún otro efecto para densidades de potencia sustancialmente menores que la establecida en la normativa del ANSI y existía la posibilidad de que alguna de ellos resultara perjudicial para la salud. (Por ejemplo, un investigador descubrió en el año 1968 que un haz pulsante de energía de microondas, con una densidad de energía media menor que una diezmilésima del valor establecido en la normativa del ANSI, podía alterar el ritmo de pulsación del corazón de rana aislado y, en ocasiones, detenía completamente dichas pulsaciones. Este descubrimiento no pudo ser confirmado por otros investigadores.) También había saltado a la luz pública que la Unión Soviética había estado bombardeando durante años con microondas de bajo nivel energético la Embajada Norteamericana en Moscú, y estas mismas noticias especulaban frecuentemente acerca de los posibles efectos sobre la salud de tales radiaciones. Por otro lado, los límites de exposición para la población en general establecidos en la Unión Soviética y los países del Pacto de Varsovia eran de 100 a 1000 veces menores que los de cualquier norma americana.

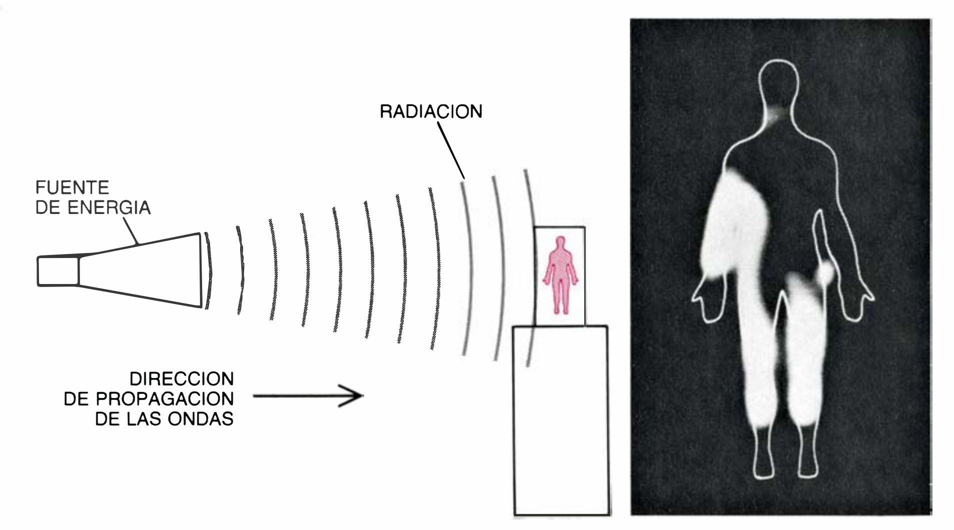
La revisión de la normativa del ANSI se debió fundamentalmente a los datos obtenidos en algunos estudios que utilizaban métodos más perfeccionados de dosimetría (medida de la energía absorbida). La absorción de energía por un animal o un ser humano depende, de forma compleja, de ciertas variables: frecuencia de la energía, tamaño del sujeto, orientación respecto a las ondas y tipo de antena de emisión utilizada. Cuando se expone a idéntica energía, una rata y un ser humano absorben cantidades muy diferentes de energía por unidad de peso del cuerpo. Este hecho era conocido desde hacía tiempo, pero la medida cuidadosa de la cantidad de energía absorbida por diferentes cuerpos no se llevó a cabo con anterioridad a la década de 1960. Al principio de esta década, los estudios realizados por algunos ingenieros aportaron datos más completos del proceso de absorción de energía, a la vez que permitieron desarrollar técnicas más perfeccionadas para medir la cuantía de dicha absorción en los animales.

Los diferentes métodos puestos a punto en las últimos veinte años se basan en el cálculo de la energía absorbida a partir de la medida del aumento de temperatura que se produce en los seres vivos. Uno de los autores de este artículo (Guy) introdujo la técnica del "fantasma partido" en el año 1968. Los operadores fabrican un molde hueco de espuma plástica con la forma de un animal, lo rellenan con un gel cuyas propiedades eléctricas se parecen a las de los tejidos vivos y lo irradian brevemente. A continuación cortan en dos el modelo y lo fotografían con una cámara de rayos infrarrojos para registrar los aumentos de temperatura. Los investigadores también pueden determinar diagramas de absorción de energía utilizando técnicas de simulación con ordenadores. El animal o la persona irradiada queda representado por un simple elipsoide o un cilindro. Se han estudiado también otros modelos matemáticos más elaborados, en los que se usan figuras compuestas por distintas piezas.

En el año 1982 todos los métodos coincidían en señalar que la cantidad de energía absorbida variaba considerablemente con la frecuencia de la radiación y el tamaño del cuerpo. Bajo circunstancias desfavorables una persona puede llegar a absorber una energía hasta 10 veces mayor en la banda de frecuencia comprendida entre los 70 y 100 megahertz que para frecuencias más altas, según sea la orientación del individuo respecto de las ondas. Las ondas electromagnéticas consisten en campos eléctricos y magnéticos perpen-



3. CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS de las microondas y de otras formas de radiación electromagnética. Perpendiculares entre sí, dichos campos son también perpendiculares a la dirección de propagación de las ondas. Cuando la radiación avanza en la dirección del eje *z*, el campo eléctrico (*color*) corre paralelo al eje *x* y el campo magnético (*gris*) es paralelo al eje *y*. (El esquema es obra de Alan D. Iselin.)



4. TECNICA DEL "FANTASMA PARTIDO" para las medidas de dosimetría de energía absorbida. Introducida en el año 1968 por uno de los autores (Guy), esta técnica se basa en la medida del aumento de la temperatura en figuras humanas o animales y permite estudiar la distribución, profundidad y cantidad de energía que se absorbería por parte de un organismo. Los técnicos vacían las dos mitades de un bloque de "Styrofoam" para formar un molde del cuerpo; luego, llenan el molde con un gel cuyas propiedades eléctricas son similares a las del tejido vivo. La figura se irradia durante un breve lapso de tiempo (*izquierda*) y se corta inmediatamente en dos mitades, fotografiando el interior con una cámara de infrarrojos para registrar el calentamiento experimentado por las diferentes regiones. La fotografía de la derecha muestra la imagen de la energía depositada en uno de tales modelos que, por razones de índole práctica, es menor que el tamaño real. El diagrama obtenido es comparable al producido por ondas de 79 megahertz (la frecuencia para la que la absorción en los seres humanos es máxima) incidiendo lateralmente sobre un hombre de 70 kilogramos de peso y 1,74 metros de altura. Las zonas brillantes corresponden a regiones con absorción elevada.

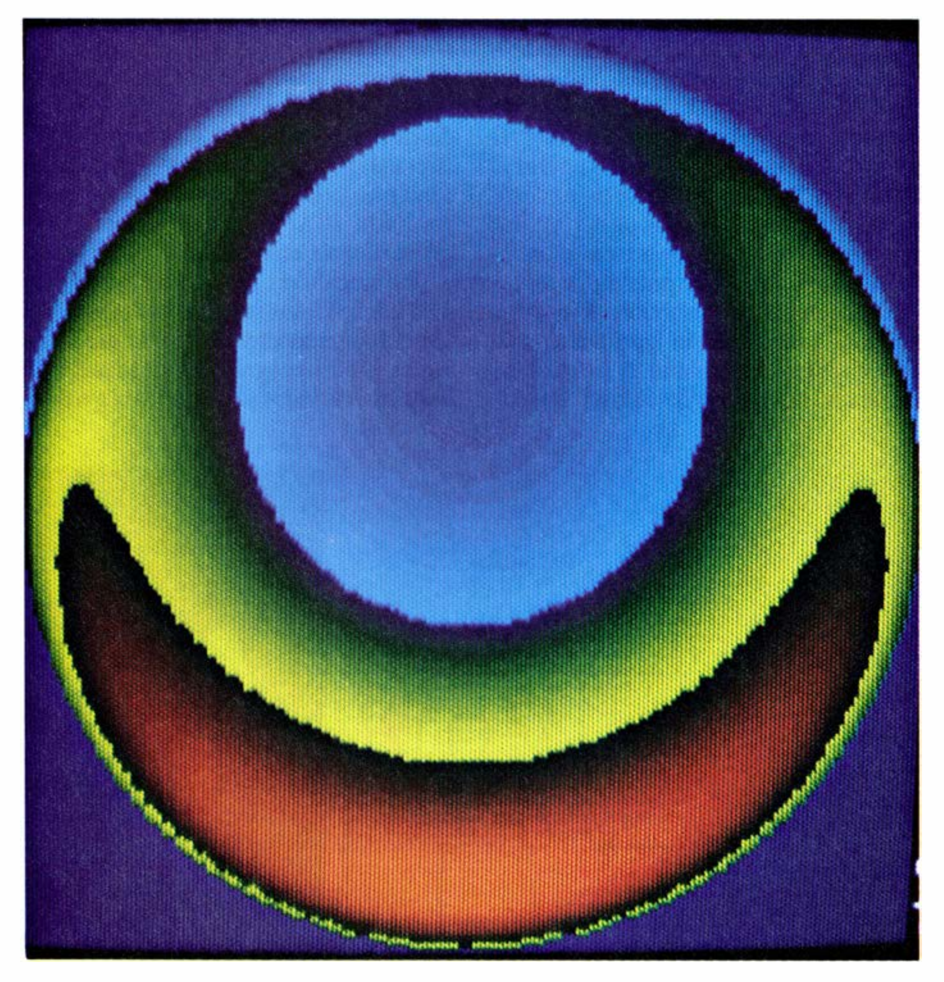
diculares entre sí y a la dirección en que se propagan las ondas [*véase la figura 3*]. La máxima absorción se produce cuando las ondas inciden sobre el cuerpo lateralmente, es decir, cuando el campo eléctrico corre paralelo al eje longitudinal del cuerpo y el campo magnético es perpendicular a la parte anterior del sujeto. El cuerpo humano es una antena eficiente para las ondas electromagnéticas en la región de los 70-100 megahertz; se dice que el cuerpo "resuena" con los campos para dichas frecuencias.

Para dar cuenta de estos efectos de resonancia, el comité del ANSI que en el año 1982 procedió a revisar la normativa estableció unos límites de densidad de potencia dependientes de la frecuencia, con el fin de limitar la energía absorbida por el cuerpo. A diferencia de la antigua normativa, que especificaba únicamente la intensidad de la energía incidente sobre el cuerpo, la nueva intentaba limitar los niveles de absorción media para todo el cuerpo a 0,4 watt por kilogramo de peso. (En caso de exposición parcial del cuerpo, los niveles de absorción permitidos pueden ser algo mayores.) El cuerpo en reposo genera calor a un ritmo dos veces superior, y cuando se realiza un ejercicio moderado la cifra resulta ser mucho mayor. En comparación con la normativa antigua, la disposición de 1982 establecía que las densidades de potencia deberían reducirse significativamente para las frecuencias de resonancia, y además se aplicaba a un intervalo de frecuencia mucho mayor, desde los 300 kilohertz a los 100 gigahertz [*véase la figura 8*]. El nivel de potencia incidente se calcula promediando la potencia a lo largo de períodos de seis minutos; en consecuencia, la norma permitía las exposiciones breves con niveles de potencia elevados.

El ANSI sólo aprobó la norma de 1982 tras una minuciosa revisión de la bibliografía científica para asegurarse de la inexistencia de efectos perjudiciales para la salud en animales expuestos a energías que produjeran ritmos de absorción por debajo de los 0,4 watt por kilogramo. El comité concluyó que el límite inferior para prevención de riesgos era un nivel de absorción de potencia de unos cuatro watt por cada kilogramo que pesara el cuerpo; en otras palabras, la norma establecía un factor de seguridad de orden 10. El comité llegó también a la conclusión de que la norma propuesta excluiría el agotamiento por calor y las quemaduras. Debería evitar también otros efectos cuya existencia y peligrosidad habían sido puestos de manifiesto con nitidez (tales como una seria alteración en el comportamiento de diferentes tipos de animales para niveles de absorción de 4 a 8 watt por kilogramo).

La norma no pretendía obviar todos los efectos conocidos, pues la bibliografía referente a muchos de dichos efectos era, y de hecho sigue siendo, problemática. Muchos estudios han demostrado que la exposición a niveles elevados de microondas, claramente peligrosa, produce síntomas de agotamiento por calor en los animales. En otros estudios, en los que los niveles de absorción son comparables a la producción de calor por el cuerpo, se ha observado la existencia de cambios que en parte podrían ser respuestas fisiológicas normales al calor adicional, aunque la manera de llegar a esta conclusión suele ser poco clara. Se han puesto de manifiesto también otros efectos para niveles de potencia bastante bajos; no se ha encontrado una explicación satisfactoria a tales efectos.

Existe una gran diversidad en la calidad de las conclusiones. Aunque muchos estudios que señalan la existencia de ciertos efectos en los seres vivos parecen haberse llevado a cabo correctamente, en algunos casos se observan deficiencias técnicas importantes (en particular, en algunos de esos trabajos, falta una dosimetría adecuada) y en otros la descripción es tan sucinta que resulta difícil juzgar su calidad. De los centenares de efectos biológicos producidos por microondas de niveles altos o bajos, un número sorprendentemente elevado son otros tantos ejemplos del fenómeno del "gato de Ches-



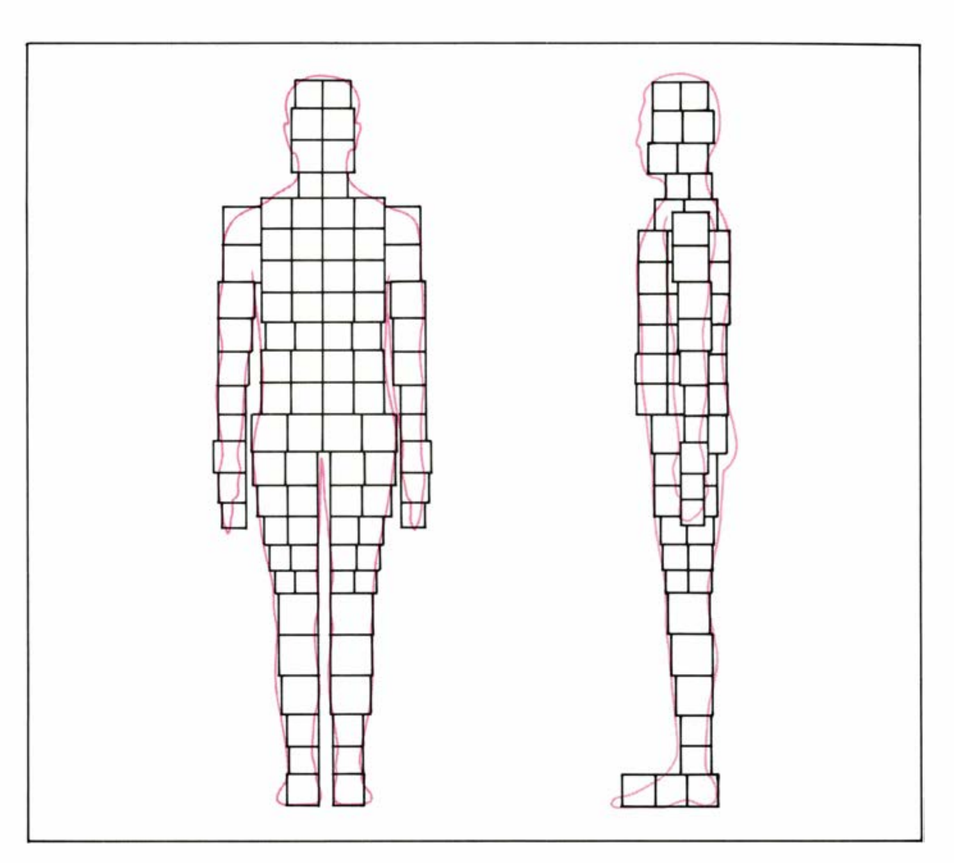
5. ESFERA GENERADA POR ORDENADOR para estudiar las figuras de absorción de energía en tejidos; reviste particular interés para comprender cómo afectan los cambios de frecuencia a la distribución de energía en el interior de los cuerpos irradiados. La esfera, que puede representar a una persona o a una parte del cuerpo, se proyecta para que sus propiedades relativas a la conducción de calor y electricidad sean similares a las de los tejidos humanos. Con la ayuda del ordenador, un investigador calcula los diagramas de energía absorbida, asignando diferentes colores para representar los distintos incrementos de temperatura. Cuando una esfera de 10 centímetros de radio se irradia con una frecuencia de 100 megahertz, la superficie frontal absorbe la mayor cantidad de energía (*rojo*); la región situada inmediatamente por debajo de la superficie absorbe una cantidad moderada (*verde*) y el centro de la esfera absorbe muy poca energía (*azul*). Para un nivel de potencia incidente de 10 watt por metro cuadrado, el aumento de temperatura máximo es pequeño: 0,003 grados Celsius. La imagen reproducida aquí fue obtenida por Haralambos N. Kritikos.

hire": ya no han vuelto a aparecer nunca más en los estudios posteriores.

Este hecho se debe en parte a la naturaleza de la propia investigación. Un investigador puede dar cuenta de cierto "efecto" apoyándose en alguna diferencia encontrada entre unos sujetos de control y otros sujetos expuestos a las microondas. El efecto en cuestión puede deberse a alguna actividad biológica provocada por la energía. Por otra parte, puede ser también el resultado de una respuesta fisiológica normal al calor proporcionado al cuerpo, de una fluctuación estadística o incluso de alguna variable experimental no controlada por los investigadores.

Para ilustrar la facilidad con que unos datos determinados se hallan sujetos a diferentes interpretaciones y producen recelos, hemos elegido tres estudios representativos. Todos los resultados encontrados en estos trabajos fueron observados para niveles de potencia situados dentro de la normativa ANSI que estaba en vigor con anterioridad a 1982 y todos ellos han intervenido en la controversia pública acerca de los posibles peligros de la energía de microondas de bajo nivel.

El primer caso se refiere a la posible influencia de la energía de microondas de bajo nivel sobre las funciones cerebrales. En el año 1975 dos equipos de investigadores norteamericanos anunciaron que la exposición a niveles de potencia entre un tercio y un cincuentavo de la norma ANSI era capaz de aumentar la cuantía con que las moléculas trazadoras penetran en el cerebro procedente de la sangre. Aunque el significado exacto de este descubrimiento para los seres humanos era difícil de juzgar, cualquier efecto de este tenor podía considerarse perturbador de la denominada barrera hematoencefálica y, por tanto, un motivo de preocupación. Como es natural, este descubrimiento reavivó la controversia relativa a la seguridad de las microondas. Una docena de grupos de investigación continuó con el estudio de esta misma cuestión durante la década siguiente. Como resultado de la realización de nuevas investigaciones y la utilización de controles de mayor calidad para bajos niveles de exposición, el efecto fue descartado. (Sin embargo, la mayoría de los investigadores se muestran de acuerdo en que la exposición a niveles de energía suficientemente elevados como para calentar significativamente el cerebro produciría alteraciones sustanciales de dicha barrera.)

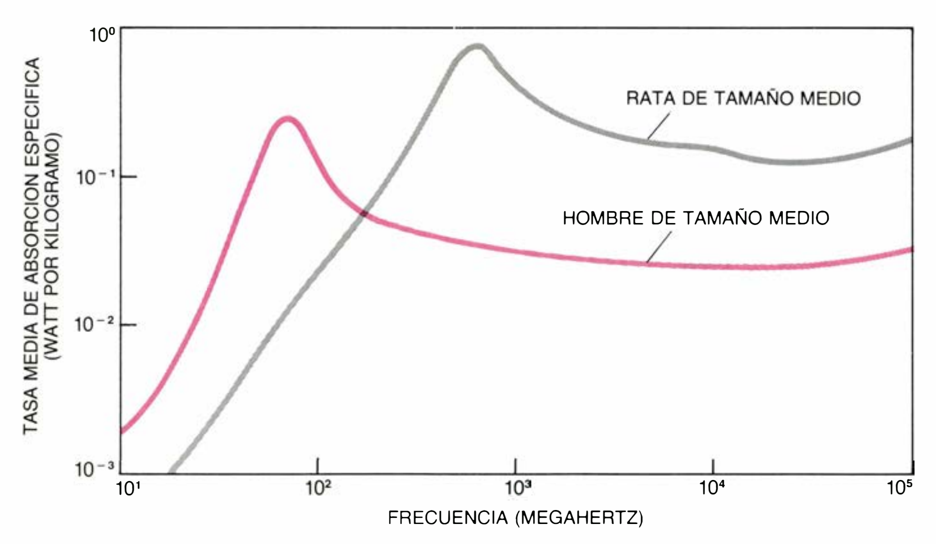


6. FIGURAS DE BLOQUES. Nos hallamos ante los modelos teóricos más complejos de los utilizados para calcular la absorción de energía. Los investigadores introducen las coordenadas de cada bloque en un ordenador. A continuación, sobre la base de las supuestas propiedades eléctricas de los tejidos, la frecuencia de la radiación y otros factores, el ordenador calcula la velocidad de absorción específica: los watt de potencia absorbida por kilogramo de peso cuando un sujeto se expone a una densidad de potencia de 10 watt por metro cuadrado. Otros modelos teóricos utilizan elipsoides llenos de un material homogéneo que representa los tejidos humanos y elipsoides que representan las capas separadas que constituyen grasa y músculos. Los resultados obtenidos en todos estos estudios teóricos concuerdan entre sí, así como con los datos obtenidos en experimentos con modelos irradiados, aumentando la confianza en la precisión de los cálculos.

El segundo caso se refiere al denominado "efecto auditivo de las microondas", conocido desde el año 1947. Cuando la cabeza de un sujeto se expone a impulsos de energía de microondas, la persona oye frecuentemente ciertos "chasquidos" sincronizados con los impulsos; dichos chasquidos parecen originarse dentro de la cabeza. Para ser oídos, los impulsos en cuestión deben ser relativamente intensos (del orden de 10.000 a 500.000 watt por metro cuadrado); sin embargo, su duración puede ser lo suficientemente pequeña (microsengudos) como para que, al promediar temporalmente la velocidad con que se absorbe la correspondiente energía, el valor resultante sea inferior al nivel de seguridad permitido.

Los resultados encontrados en uno de los primeros estudios realizados sobre este efecto sugerían que el centro del cerebro era la región más sensible para producir los chasquidos. De este modo surgió la alarmante posibilidad de que los impulsos de energía de microondas podían actuar directamente sobre el cerebro. En el año 1974, uno de nosotros (Foster) propuso que los chasquidos observados podían deberse a un efecto físico benigno que acompañe a la absorción de energía en la cabeza. El mecanismo propuesto era muy simple: la expansión térmica del tejido, producida por un calentamiento minúsculo, aunque muy brusco (del orden de algunas millonésimas de grado en cada impulso), origina ondas sonoras que son percibidas por el sujeto en forma de chasquidos. La realización de cálculos muy sencillos y de experimentos con figuras llenas de agua demostró que las ondas sonoras provocadas por los impulsos de microondas podían llegar a ser audibles. Los estudios llevados a cabo con animales confirmaron poco después la hipótesis. El efecto auditivo de las microondas no está considerado actualmente como peligroso.

Nuestro ejemplo final se refiere a un estudio muy amplio realizado por uno de los autores (Guy) y sus colaboradores en la Universidad de Washington en Seattle. Sus resultados po-



7. TASA DE ABSORCION DE LA ENERGIA por una rata de tamaño medio y el hombre. Diferente para la mayoría de las frecuencias, presenta algunos máximos en ciertas frecuencias características, tal como han demostrado los estudios comparativos llevados a cabo con modelos elipsoidales. La tasa de absorción específica del hombre muestra un aumento pronunciado para unos 70 megahertz, en tanto que para la rata dicho aumento se presenta en las proximidades de los 1000 megahertz. Las grandes diferencias en los valores de la velocidad de absorción específica según las especies están originadas por las propiedades características de sus cuerpos al actuar como antenas. Estas diferencias, junto con las distintas respuestas fisiológicas al calor, son importantes fuentes de incertidumbre cuando los investigadores intentan extrapolar los resultados obtenidos con animales para determinar un valor umbral de potencia por encima del cual las microondas constituyan un peligro para los humanos. Las curvas se refieren a la absorción para sujetos expuestos a ondas que se propagan hacia el cuerpo con un ángulo tal que favorece al máximo la absorción de energía. (El campo eléctrico es perpendicular al eje longitudinal del cuerpo; el campo magnético es perpendicular a su plano frontal.) Los datos han sido obtenidos por Carl H. Durney, de la Universidad norteamericana de Utah.

nen de manifiesto las ambigüedades típicas que se presentan en los estudios de apantallamiento, que son la base de muchas investigaciones sobre los efectos de las microondas. El estudio –de tres años de duración– sobre los efectos de la radiación de bajo nivel a largo plazo fue subvencionado por la Escuela de Medicina Aeroespacial de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos de Norteamérica.

Consistía en la comparación de 100 ratas irradiadas durante la mayor parte de su vida con otras 100 ratas que no habían sido expuestas a la radiación, tratadas por lo demás de forma idéntica a las anteriores. La radiación incidente sobre el grupo experimental tenía un nivel de potencia medio de cinco watt por metro cuadrado y una frecuencia de 2,45 gigahertz. Las ratas fueron expuestas durante 21 horas diarias a lo largo de 25 meses. Por término medio, dependiendo de su edad, habían absorbido entre 0,2 y 0,4 watt por kilógramo de peso; este último valor era igual al actual límite ANSI para la exposición de seres humanos.

Los investigadores examinaron 155 parámetros diferentes de salud y comportamiento; entre ellos: química de la sangre, peso del cuerpo, consumo diario de agua y comida, consumo de oxígeno, producción de dióxido de carbono y nivel de actividad. Los resultados encontrados pusieron de manifiesto pocas diferencias entre las ratas expuestas y las de control; además, la mayoría de tales diferencias no eran estadísticamente significativas o aparecían y desaparecían, sugiriendo que podían deberse al azar. Por ejemplo, los niveles de cortisona en el plasma (indicativos del nivel de actividad) fueron más elevados para el grupo expuesto que para el grupo de control durante la primera sesión, pero la situación se invirtió en la tercera sesión.

Los primeros estudios realizados sobre este problema habían sugerido que las microondas podrían afectar al sistema inmunológico. Y así, el grupo de Seattle evaluó la función de los linfocitos, un tipo de célula fundamental para la respuesta inmunológica. Algunos de los tests inmunológicos realizados, aunque no todos, pusieron de manifiesto algunas diferencias entre los animales expuestos y los de control al cabo de 13 meses. Transcurridos 25 meses, las diferencias ya no eran apreciables. El tiempo de supervivencia de los animales expuestos fue ligeramente mayor que el de los animales de control: 688 días frente a 633 días, una diferencia debida probablemente al azar.

Una diferencia sí era preocupante: se desarrollaron tumores malignos primarios en 18 de los animales expuestos y tan sólo en 5 animales de control. La probabilidad de que esta diferencia se produzca en dos muestras con una población idéntica de 100 animales cada una es del orden de 0,005; se trata, pues, de una diferencia altamente significativa desde el punto de vista estadístico.

A primera vista, este último resultado sugería que los niveles bajos de radiación de microondas pueden producir cáncer en las ratas (y por extensión en los seres humanos). El descubrimiento fue ampliamente comentado en los medios de comunicación en 1984 y ha sido utilizado con frecuencia en los debates públicos sobre propuestas de instalación de equipos de microondas. Sin embargo, se pueden hacer varias consideraciones antes de llegar a conclusiones demasiado precipitadas.

Por una parte, el número total de tumores malignos en los animales de control era inferior al esperado para la raza de ratas utilizadas en la experiencia; en cambio, la frecuencia de aparición de tumores malignos en las ratas expuestas era más o menos la esperada. En consecuencia, los animales expuestos presentaban un exceso de tumores únicamente en relación con los de control, y no en comparación con la frecuencia de desarrollo de tumores que se observa generalmente en esta estirpe de ratas.

También surgen otros problemas de naturaleza estadística. El número de tumores encontrados fue tan bajo que en el análisis estadístico tuvieron que agruparse los cánceres de todo tipo. No predominaba una clase única de tumor y no se encontró ningún tipo nuevo en relación con los detectados en los estudios anteriores. Si hubiera predominado un tipo particular, el resultado hubiera reforzado considerablemente la conclusión de que la energía de microondas de niveles bajos posee efectos oncogénicos.

La comparación de tumores era simplemente una más de las 155 comparaciones diferentes realizadas en el estudio. Dado que el número de cotejos era muy elevado, algunas de las diferencias encontradas pueden ser en realidad ocurrencias aleatorias. El cáncer descubierto puede ser una de las anomalías. En otras palabras, el descubrimiento de un exceso de cáncer parece provocador, pero no podemos afirmar que sea una consecuencia de la actividad biológica de la radiación de microondas. Para demostrar de forma fe-

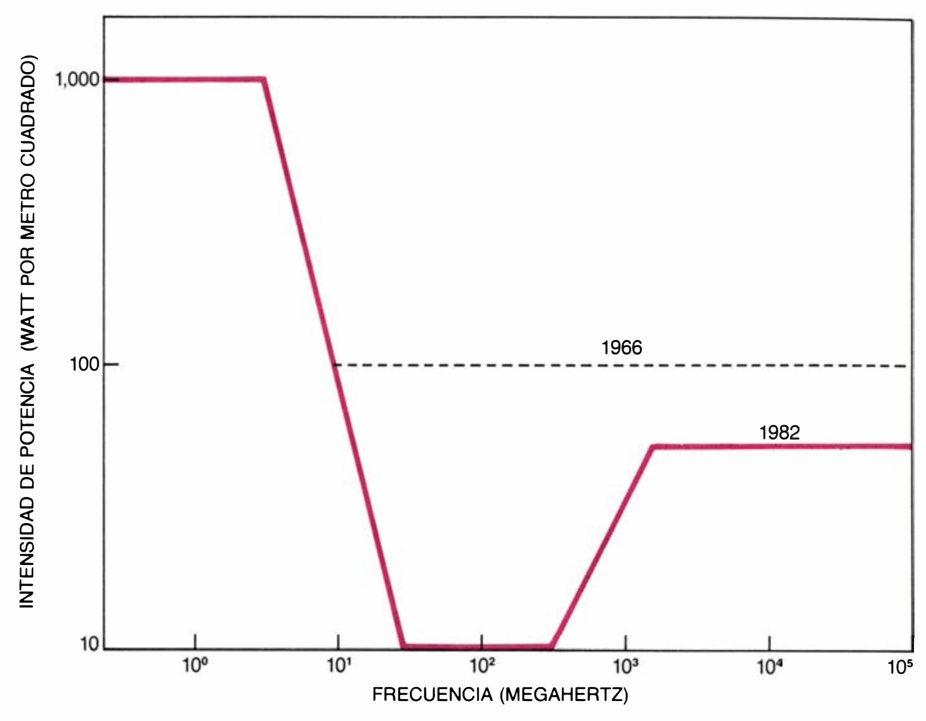
haciente la existencia de una relación entre la irradiación con microondas y el desarrollo de cualquier tipo específico de tumor sería necesario llevar a cabo una investigación cientos de veces más extensa y más cara que el estudio de Seattle, algo tal vez irrealizable. La conclusión que extraemos de todos estos ejemplos y de la amplia bibliografía sobre las microondas es que, aunque en el futuro se demostrara la existencia de alguna peligrosidad por parte de los campos débiles de microondas, en el presente las pruebas existentes sobre tal riesgo resultan poco convincentes.

Aceptando la persistencia de alguna incertidumbre en este sentido, ¿cómo debería plantearse la investigación futura y sobre qué bases habría que establecer una nueva normativa? A lo largo de la presente década, el apoyo del gobierno de los Estados Unidos para la investigación sobre los posibles efectos biológicos de los campos electromagnéticos (entre los que se contaban los referentes a líneas de alta tensión y a las ondas de radio) se puede cifrar en unos 10 millones de dólares anuales.

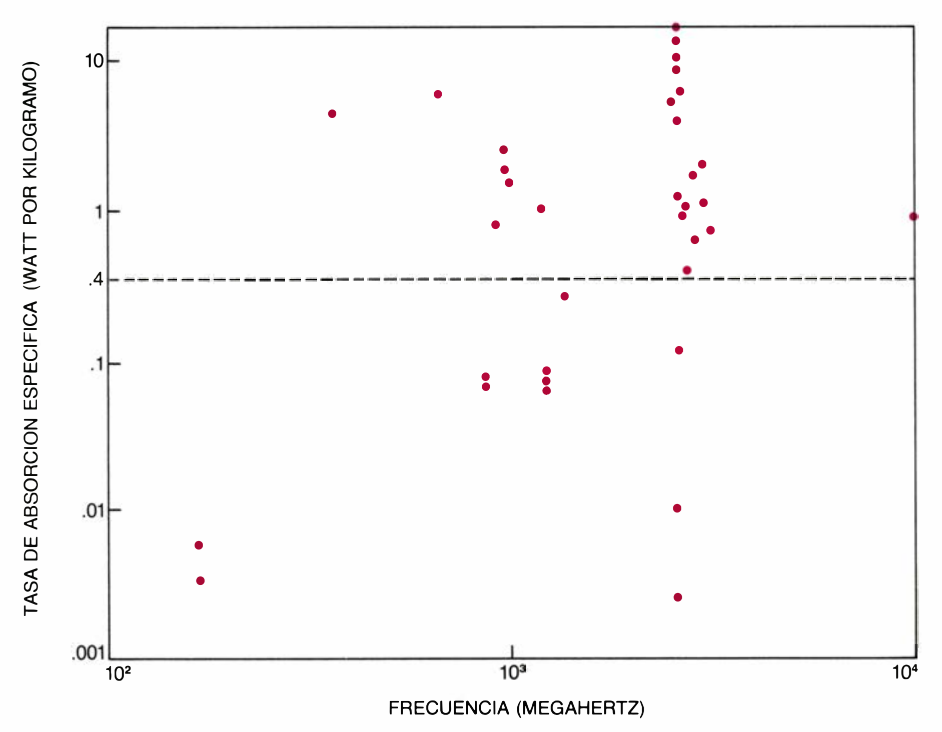
El trabajo realizado, considerado conjuntamente con los estudios anteriores, ha conducido a un consenso entre la mayoría de los investigadores en el sentido de que la única prueba clara sobre los peligros de las microondas se pone de manifiesto en niveles de exposición elevados. Más allá de esta conclusión, el acuerdo es difícil. Los científicos discrepan en lo concerniente al significado de los efectos reseñados en animales expuestos a niveles ligeramente inferiores a la norma del ANSI. No es probable que estos desacuerdos conduzcan a cambios drásticos en la normativa de exposición. Por otro lado, el debate público se ha centrado frecuentemente en la posibilidad de riesgo para niveles de exposición mucho más bajos y en la posible necesidad de normas más severas.

Una mayor coordinación de la investigación futura aclararía parte de la confusión científica y pública. Muchas instituciones gubernamentales, incluidas las militares, han subvencionado investigaciones sobre los efectos biológicos de las microondas. La falta de coordinación entre esas instancias ha dado lugar a una gran dispersión en los planteamientos, hasta el punto de que han proliferado los estudios preliminares y muy pocos han continuado profundizando.

Antes de que se comenzaran nuevas

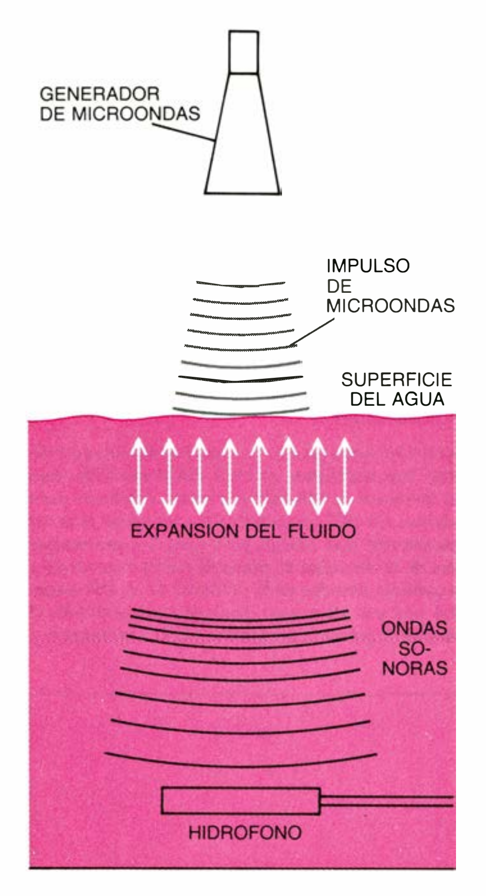


8. NORMA ACEPTADA para la exposición máxima laboral y pública a las microondas. Establecida en 1966 por el Instituto Nacional de Regulación de América (ANSI), fue modificada en 1982. En el año 1966, esta norma voluntaria permitía un nivel máximo de potencia incidente de 100 watt por metro cuadrado para frecuencias comprendidas entre 10 megahertz y 100 gigahertz. En 1982, un comité del ANSI revisó el límite citado con el fin de tener en cuenta que el cuerpo humano absorbe más energía para unas frecuencias que para otras. La versión de 1982 contempla la dependencia de la densidad de potencia con la frecuencia y disminuye los niveles de potencia permitidos para las frecuencias situadas en la vecindad de los 100 megahertz. La normativa se propone limitar la absorción a 0,4 watt por kilogramo, promediando para todo el cuerpo. Si sólo se expone una parte del cuerpo, las intensidades de potencia permitidas pueden ser mayores.



9. EFECTOS BIOLOGICOS DE LA RADIACION, recogidos en varios trabajos, y representados por el comité del ANSI (*puntos*) en función de la tasa de absorción específica y la frecuencia, antes de que dicha organización procediera a revisar su normativa sobre la exposición en el año 1982. Para los efectos que tienen lugar con tasas de absorción específica superiores a los cinco watt por kilogramo, los resultados suelen coincidir en lo que respecta a la naturaleza del efecto y a la tasa de absorción específica que lo produciría. Para los efectos observados a niveles de potencia inferiores, el acuerdo es estudios es mucho menor. La mayoría de los efectos encontrados para los niveles más bajos no fueron considerados peligrosos. El ANSI determinó posteriormente que los efectos que podían serlo se producían con tasas de absorción específica de cuatro watt por kilogramo como mínimo; en el año 1982 dicha organización estableció un valor límite para la tasa de absorción específica de 0,4 watt por kilogramo (*línea de trazos*), introduciendo un factor de seguridad de 10.

investigaciones, el Gobierno debería comprometerse a subvencionar la realización de estudios independientes que repitieran otros anteriores, así como estudios complementarios cuyo objetivo fuera explorar el significado de los nuevos descubrimientos. Algunas instituciones parecen moverse actualmente en esa dirección. El Ejército, las Fuerzas Aéreas y la Marina están subvencionando estudios complementarios sobre recientes trabajos conflictivos. A su vez, es necesario establecer criterios para determinar cuándo se debe detener una investigación sobre un tema concreto, incluso en el caso de que algunas cuestiones queden sin respuesta.



10. EFECTO AUDITIVO de las microondas, un ruido en forma de chasquido que se oye cuando se dirigen impulsos de microondas a la cabeza. Según la explicación dada en 1974 por uno de los autores de este artículo, Foster, la cabeza responde a las microondas de forma similar a como lo hace el agua. Cuando el agua absorbe impulsos de microondas, su temperatura experimenta un aumento repentino, aunque muy pequeño. La expansión resultante del fluido origina una onda sonora que se propaga desde la superficie del agua y que puede ser registrada con un hidrófono, oyéndose a veces incluso el chasquido. Foster sugirió que el mismo proceso se desarrollaba en los tejidos de la cabeza cuando se exponían a pulsos de microondas. La audición de chasquidos es uno de los pocos efectos inequívocos de la energía de microondas que tiene lugar para densidades de potencia media que pueden ser inferiores al valor establecido por la normativa del ANSI. El efecto auditivo fue observado en 1947, pero su mecanismo sólo se pudo explicar algunos años más tarde. Este efecto no se considera que represente hoy peligro alguno.

Aunque se cuente con una mejor coordinación de la investigación, no será posible demostrar la ausencia absoluta de peligro, lo cual significa que las regulaciones no pueden garantizar una seguridad total cuando establecen unas normas. La regulación es la forma a través de la cual la sociedad equilibra los beneficios de la tecnología con los riesgos potenciales. Los límites de la velocidad del tráfico establecen cierto compromiso entre el peligro que supone una velocidad excesiva y el deseo de la mayoría de la gente de viajar tan rápidamente como sea posible. Los límites no ofrecen la promesa de un riesgo nulo para velocidades inferiores a ellos, sino que simplemente legitiman las velocidades para las que es improbable que los peligros conocidos constituyan un problema serio. De forma análoga, los límites de la exposición a las microondas (y a otros agentes ambientales) se pueden basar únicamente en los peligros conocidos, incluyendo un factor de seguridad. La revisión de la normativa ANSI en 1982 es un ejemplo de este planteamiento. Cuando los avances de la dosimetría pusieron de manifiesto que el cuerpo humano absorbía más energía a unas frecuencias específicas, el ANSI estableció un margen de seguridad más amplio para tales frecuencias.

Los Estados Unidos no disponen de un planteamiento riguroso para el establecimiento de estas normas. Los diferentes departamentos federales establecen sus propios límites y lo mismo hacen los estados, condados y organizaciones no gubernamentales. Para cubrir situaciones diferentes se aplican regulaciones diferentes con diferentes grados de fuerza legal. Las regulaciones pueden ser voluntarias u obligatorias y aplicarse a grupos restringidos o al público en general. Una ciudad puede imponer regulaciones que difieran de las de su condado, que a su vez puede imponer otras normas diferentes de las de la institución federal pertinente. Estas divergencias pueden forzar a los usuarios de las ondas electromagnéticas a regirse por normas diferentes y suponen, además, una responsabilidad adicional para los departamentos gubernamentales.

La Oficina de Protección del Medio de los Estados Unidos (EPA) ha iniciado un proceso que puede conducir a una normativa más uniforme para el gran público. A principios de este año sometió a la opinión pública tres reglamentos posibles: uno de ellos era similar a la normativa del ANSI (aunque no idéntico), otro era cinco veces menor que la normativa ANSI y el tercero era diez veces menor que la normativa ANSI. La norma final de la EPA no se publicará probablemente antes de un año, pero, si finalmente se adopta una regulación, es posible que estimule la realización de otros esfuerzos para codificar nuevas pautas de interés para toda la comunidad.

Resulta curioso que la Unión Soviética y los países del Pacto de Varsovia hayan relajado recientemente sus códigos. Al menos un comentarista soviético ha señalado que un nivel de exposición aceptable serían 0,4 watt por kilogramo durante una hora, un valor comparable al límite actual del ANSI de 0,4 watt por kilogramo promediado a lo largo de seis minutos. Las actuales normas soviéticas para la exposición laboral a la energía de las microondas son de dos watt por metro cuadrado para fuentes estacionarias y de 20 watt por metro cuadrado para fuentes móviles, ambos promediados a lo largo de una hora. Los niveles para el público en general son inferiores: 0,1 watt por metro cuadrado. En resumen, las normativas soviética y norteamericana se muestran básicamente coincidentes.

El establecimiento de normas constituye un proceso de sorprendente complejidad. Algunos de los riesgos de la energía de microondas, tales como las quemaduras y el agotamiento por calor, se consideran correctamente asentados; en estos casos se pueden elaborar normas efectivas. El reconocimiento de otros efectos perjudiciales como resultado de una exposición a energía de microondas a bajos niveles es objeto de conjeturas, ya que depende de la interpretación de un extenso conjunto de investigaciones que con frecuencia son poco fiables. La forma en que debemos equilibrar los beneficios de la tecnología con los costes de los riesgos posibles es un problema urgente, tanto en lo que respecta a la energía de las microondas como a otros muchos agentes ambientales, el estudio de cuyos peligros potenciales no ha hecho más que empezar.

De la topología a la química

Los métodos que se fundan en la topología de las moléculas, es decir, en la estructura geométrica que dibujan los átomos, y dejan de lado su morfología tridimensional permiten predecir un amplio abanico de propiedades químicas

Dennis H. Rouvray

Los químicos han logrado ya sintetizar y medir varias propiedades de más de siete millones de moléculas diferentes. Esa información, almacenada en centrales de bases de datos, está al alcance, casi instantáneo, de cualquier investigador que necesite saber de cualquier molécula aislada. ¿No podría emplearse toda esa información con un propósito más ambicioso? Por señalar una dirección: ¿podría aprovecharse para predecir qué propiedades presentará una sustancia química antes de producirse incluso su síntesis, antes de contar con una molécula de la sustancia en cuestión que tenga existencia física?

La posibilidad de realizar ese tipo de predicciones ha obsesionado a los químicos durante generaciones. Y ese sueño comienza a adquirir cuerpo gracias a una nueva técnica que, si bien se halla en sus primeras fases, puede atribuirse un importante número de éxitos en un conjunto notablemente amplio de aplicaciones. El nervio de la nueva técnica a que aludimos es la topología de cada molécula: la estructura de las interconexiones entre los átomos moleculares, que determinará la arquitectura definitiva de la molécula.

Por lo que al análisis topológico se refiere, importan poco la morfología tridimensional real de la molécula, la naturaleza y longitud de los enlaces químicos que ligan sus átomos o los ángulos entre dichos enlaces; a veces se desentiende incluso del tipo de átomos que componen la molécula en cuestión. Lo que realmente cuenta son estos otros aspectos: cuántos átomos hay en la molécula, a cuántos se une cada uno, si forman una sola cadena lineal, una cadena lineal con ramificaciones, o si constituyen un anillo, varios o combinaciones de anillos, cadenas y ramificaciones.

Reciben el nombre de índices los útiles principales de que se vale el método topológico para realizar sus predicciones químicas. Se obtienen mediante algoritmos (procedimientos) que definen la estructura topológica de una molécula a través de un número característico. Podríamos crear un índice, por ejemplo, sumando el número total de anillos de una molécula o el número de átomos que se hallan unidos a tres o más.

Para avanzar una predicción química fundada en la topología, hay que empezar por asignar un índice a un grupo bastante restringido de moléculas conocidas. En general, el valor del índice (el número que hayamos obtenido tras el análisis prefijado de la molécula) diferirá de una molécula a otra. Se construye, luego, un gráfico en el que un eje represente el valor del índice de la molécula y, el otro, alguna propiedad química (verbigracia, el punto de ebullición). Cada molécula así acotada se señalará con un punto en la representación gráfica. Si se descubre una línea que una los puntos razonablemente bien, ella nos servirá de base para establecer las predicciones, porque manifiesta una relación entre el índice y la propiedad química: nos señala, por ejemplo, qué punto de ebullición cabe esperar en una molécula que posea un valor determinado del índice. De esta manera, las propiedades de moléculas conocidas nos auxilian en la predicción de propiedades de moléculas que todavía no existen. La clave del método se encierra en hallar el índice que mejor se correlaciona con la propiedad química sujeta a estudio.

El método topológico ha encontrado aplicaciones que trascienden la mera predicción de propiedades químicas. Se puede recurrir a él para el control y la construcción de modelos de la corrosión, para el desarrollo de nuevos anestésicos y fármacos psicoactivos, para predecir el grado de dispersión de distintos contaminantes en el ambiente y el riesgo de semejante dispersión, para calcular el potencial cancerígeno de determinadas sustancias químicas y hasta para elaborar cervezas de especial sabor. No se duda ya de la aplicabilidad del método topológico a esos dominios. Lo que está por ver es el tiempo que se tardará en aprovechar todas sus posibilidades.

Se había venido siguiendo dos vías fundamentales para predecir las propiedades de moléculas no sintetizadas todavía. Consistía la primera en la determinación de la estructura precisa de la molécula (las coordenadas espaciales exactas de todos sus átomos) y en la aplicación de las reglas de la mecánica cuántica a dicha estructura, determinando en consecuencia las formas y energías de sus nubes electrónicas, a partir de las cuales se inferían muchas propiedades moleculares. Tratábase de un proceso laborioso, que consumía largas horas de ordenador. Además, los resultados obtenidos limitaban su rango de aplicación a la molécula sometida al análisis; no abría ningún camino que llevara a los resultados que cabría esperar con moléculas análogas.

La segunda vía, más sencilla, buscaba determinar las propiedades de fragmentos básicos encontrados en diversas moléculas, combinando luego esas propiedades de los fragmentos de acuerdo con la morfología de la molécula en cuestión. Las propiedades de cada fragmento solían establecerse mediante el análisis de una serie de moléculas similares a la estudiada.

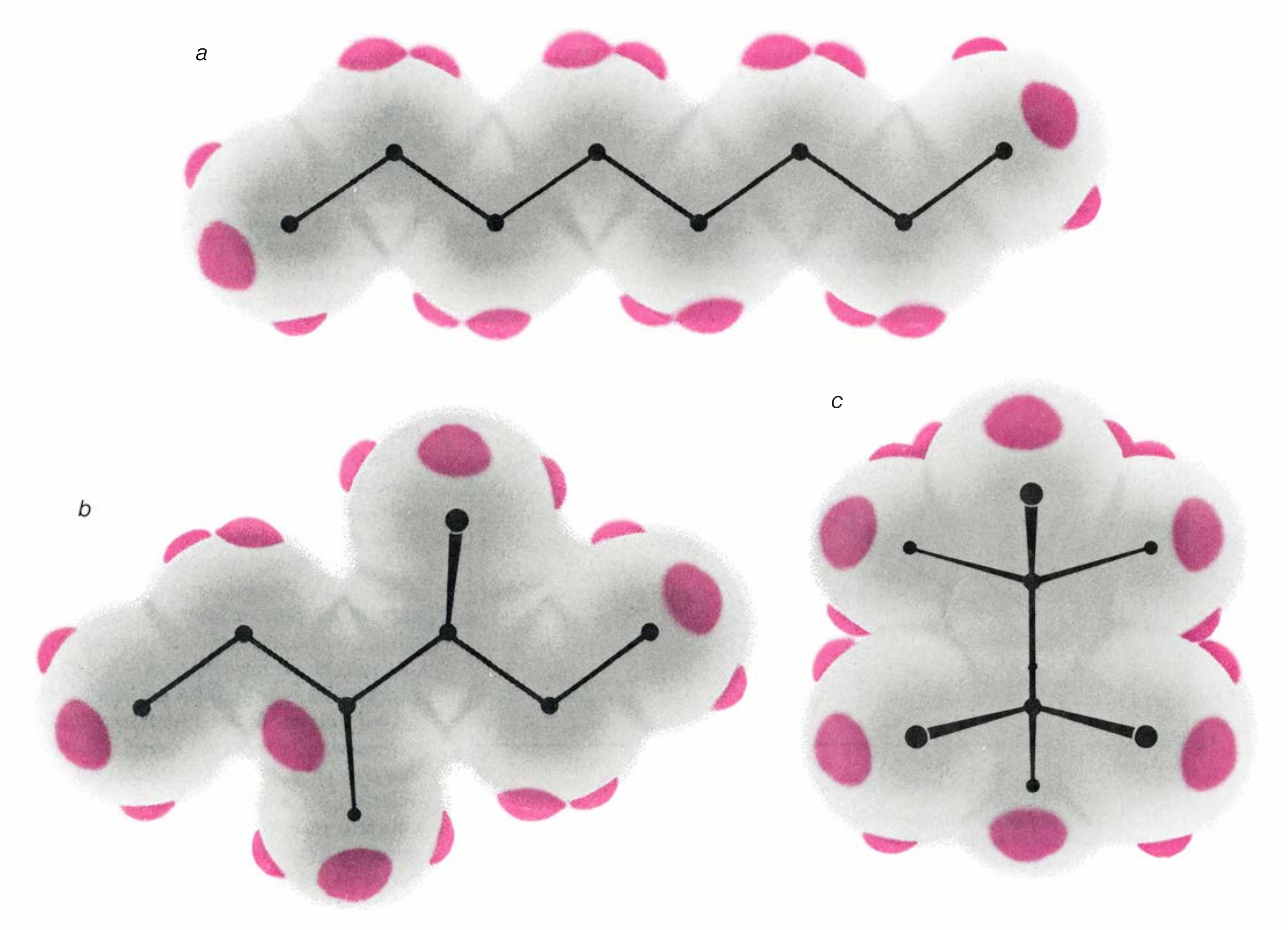
En ambos enfoques, se trataba de relacionar una noción –no muy bien definida– de estructura con el comportamiento molecular, éste sí bien acotado. La nueva técnica topológica parte de la suposición de que la estructura molecular admite una caracterización matemática, precisa, y considera también que los parámetros moleculares deter-

minados matemáticamente pueden correlacionarse con propiedades moleculares medidas experimentalmente. No se exige inferir las propiedades químicas a partir de estructuras físicas fundamentales; basta elegir una forma matemática de asignar números a las moléculas, y después correlacionarlos con la rica base de datos relativos a las propiedades químicas conocidas. Las correlaciones perfectas son imposibles: si bien los parámetros matemáticos se determinan con precisión, los resultados experimentales conllevan siempre cierto margen de error. En todo caso, unos datos experimentales fiables posibilitan buenas correlaciones.

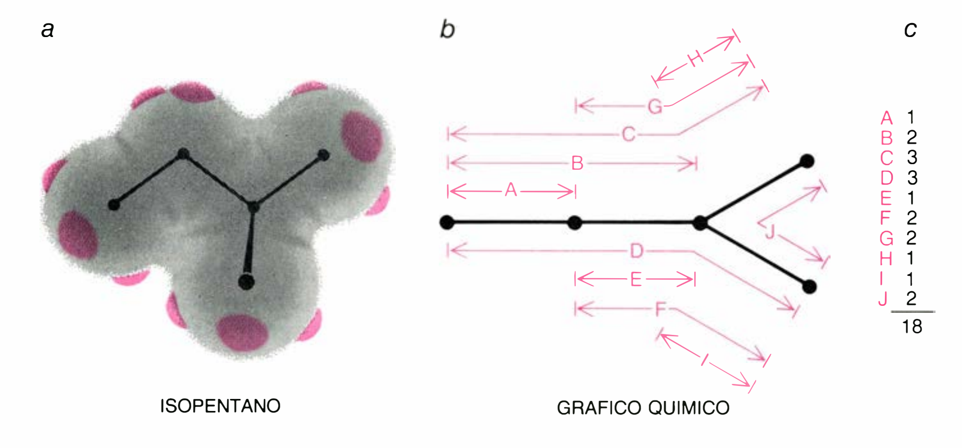
El análisis topológico de una molécula comienza por la representación de los átomos de la misma mediante puntos y la de los enlaces por segmentos. La longitud de las líneas y los ángulos que forman entre sí carecen de interés; sí importa la existencia de una conexión entre los átomos, y no tanto la naturaleza precisa de la misma. (Aunque la pérdida de información sobre las longitudes y orientaciones relativas de los enlaces pudiera parecer perjudicial, en la práctica esa suerte de conocimiento no reviste la importancia que pudiera aparentar.)

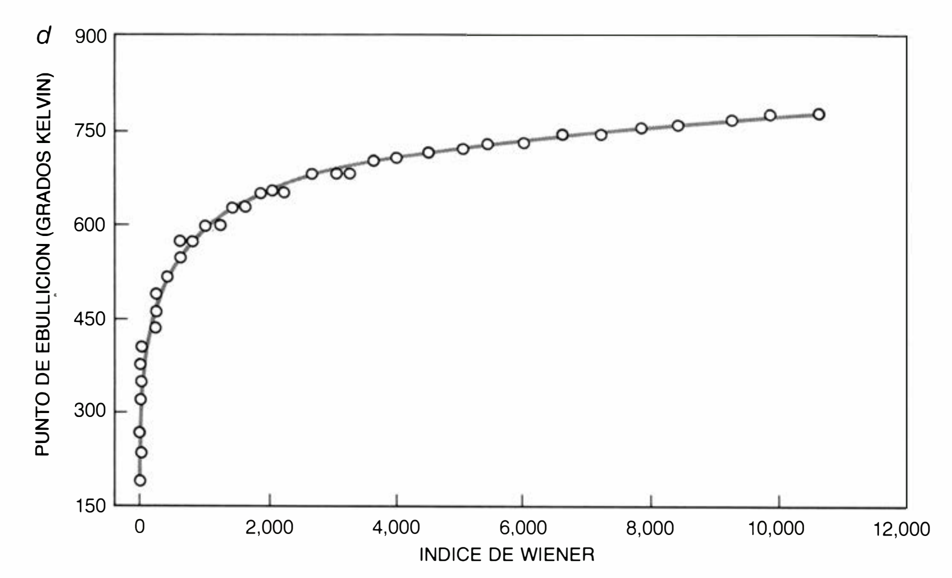
Las representaciones de ese orden se denominan grafos químicos. Reproducen las estructuras de una forma abstracta. Estudiados hace ya más de un siglo por el matemático Arthur Cayley, constituyen hoy la base de una disciplina matemática: la teoría de grafos. En teoría de grafos, a los puntos se les suele llamar vértices y, a las líneas, aristas. Los grafos químicos son la herramienta básica usada en la aplicación de técnicas de la teoría matemática de grafos a los problemas específicos de la química. (En los grafos químicos, los átomos de hidrógeno suelen frecuentemente omitirse, porque no desempeñan, de ordinario, ningún papel relevante en la determinación de la estructura de una molécula.)

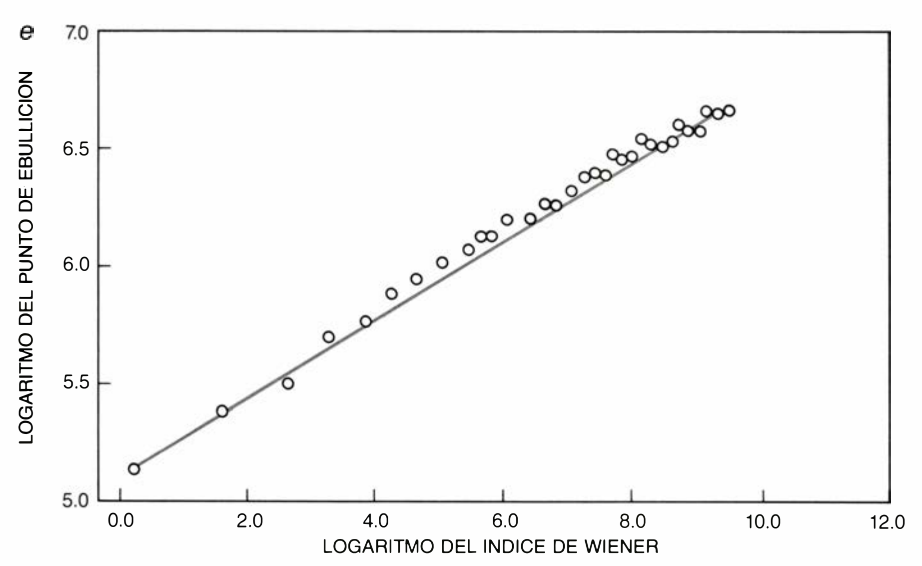
Una vez dibujado el grafo químico de una molécula, resulta bastante sencillo obtener del mismo un índice topológico y deducir un número que caracterice dicho grafo. Obviamente, el número debe tener el mismo valor para una molécula dada, cualquiera que sea la manera en que se haya dibujado o construido el grafo. Los matemáticos denominan invariante del grafo al número en cuestión. Uno de los primeros invariantes de grafo, o índices topológicos, que consideraron los químicos fue el que los matemáticos conocen por número de vértices y los químicos por número de carbonos. En matemática, se trata del número de vértices



1. MOLECULAS DE HIDROCARBUROS: podrían presentar formas muy distintas, aun cuando poseyeran volúmenes parecidos. Los métodos topológicos para predecir el comportamiento químico de las moléculas hacen hincapié en un aspecto particular de la estructura molecular: la geometría de interconexión entre sus átomos. En el análisis topológico no se tienen en cuenta aspectos como la morfología tridimensional real de la molécula y los ángulos entre sus enlaces; importa, por contra, a cuántos átomos está unido cada átomo y si se enlazan formando una cadena lineal, una estructura ramificada o un anillo. Aunque el análisis topológico deja aparte lo que pudieran parecer aspectos estructurales básicos, se ha demostrado eficaz en la predicción de múltiples fenómenos, desde los puntos de ebullición de varias sustancias hasta la probabilidad de que ciertos contaminantes se dispersen en el ambiente. Las moléculas mostradas aquí corresponden al *n*-octano (*a*), 3,4-dimetilhexano (*b*) y 2,2,3,3-tetrametilbutano (*c*). Todas ellas están formadas por átomos de hidrógeno (*color*) y carbono (*gris*).







2. INDICE DE WIENER: procedimiento desarrollado por Harry Wiener, del Brooklyn College, para convertir la estructura topológica de una molécula en un sencillo número descriptivo; en dicho índice se funda la predicción del comportamiento químico. Se empieza por representar la estructura molecular (*a*) en un "grafo químico" (*b*), en el que los átomos se simbolizan por puntos (llamados vértices) y los enlaces por líneas (llamadas aristas). Este grafo corresponde a la molécula de isopentano. El índice de Wiener se calcula (*c*) sumando todos los enlaces que habría que atravesar a lo largo de la molécula para ir de un átomo cualquiera a otro. El índice de Wiener se correlaciona con bastantes propiedades físicas. Así, cuando el índice de Wiener de cierto número de moléculas conocidas se representa en función de los puntos de ebullición de las mismas (*d*), los puntos se pueden ajustar mediante una curva suave. La línea se convierte en una recta cuando se representa el logaritmo de los puntos de ebullición en función del logaritmo del índice de Wiener (*e*). El punto de ebullición de una molécula cuyas propiedades no se conozcan puede predecirse calculando el índice de Wiener de la molécula y buscando en la línea el lugar correspondiente. Pueden hacerse correlaciones similares con otras propiedades químicas e índices topológicos. (Ilustraciones realizadas por George Retseck.)

que presenta el grafo; aplicado a una molécula de hidrocarburo (constituida por átomos de carbono e hidrógeno) equivale al número de átomos de carbono. Los químicos han venido apoyándose, durante más de un siglo, en el número de carbonos para deducir ciertas correlaciones, sin advertir que estaban manejando un índice topológico.

El número de carbonos constituye un índice apropiado para analizar las moléculas de cadena lineal, pero no sirve para moléculas ramificadas, cuya morfología puede diferir de una a otra aun cuando posean el mismo número de átomos de carbono. En razón de que muchas moléculas diferentes presentan el mismo número de átomos de carbono, se dice que dicho número constituye un índice con bajo poder discriminante. Se impone, pues, descubrir otros índices capaces de distinguir resueltamente entre moléculas ramificadas y no ramificadas, e incluso entre moléculas con distintas estructuras ramificadas.

Aunque el primer índice topológico capaz de caracterizar la "ramificación" de moléculas lo propuso en 1947 Harry Wiener, del Brooklyn College, hasta los últimos años no han advertido los químicos el enorme potencial que encerraba. El índice de Wiener se funda en la noción de distancia según la entiende la teoría de grafos: la distancia que media entre dos vértices cualesquiera es igual al número de aristas que habría de atravesar si tomáramos el camino más corto, en el grafo molecular, para ir de un vértice a otro. El índice de Wiener de una molécula es igual a la suma de las distancias grafoteóricas entre todos los pares atómicos de la molécula [*véase la figura 2*].

Al igual que el número de carbonos, el índice de Wiener de una molécula se caracteriza por ser mayor en las moléculas que poseen más átomos; aporta, además, cierta información sobre el alcance de la ramificación molecular. Es mayor, dicho índice, para moléculas extensas y, menor, para moléculas compactas. Tras su introducción por Wiener, otros investigadores han descubierto que, en lo referente a determinados tipos de moléculas de hidrocarburos, el índice establece una muy buena correlación con ciertas propiedades (punto de ebullición, viscosidad y tensión superficial e índice de refracción, que nos señala cuánto desvía una substancia el trayecto de un rayo luminoso).

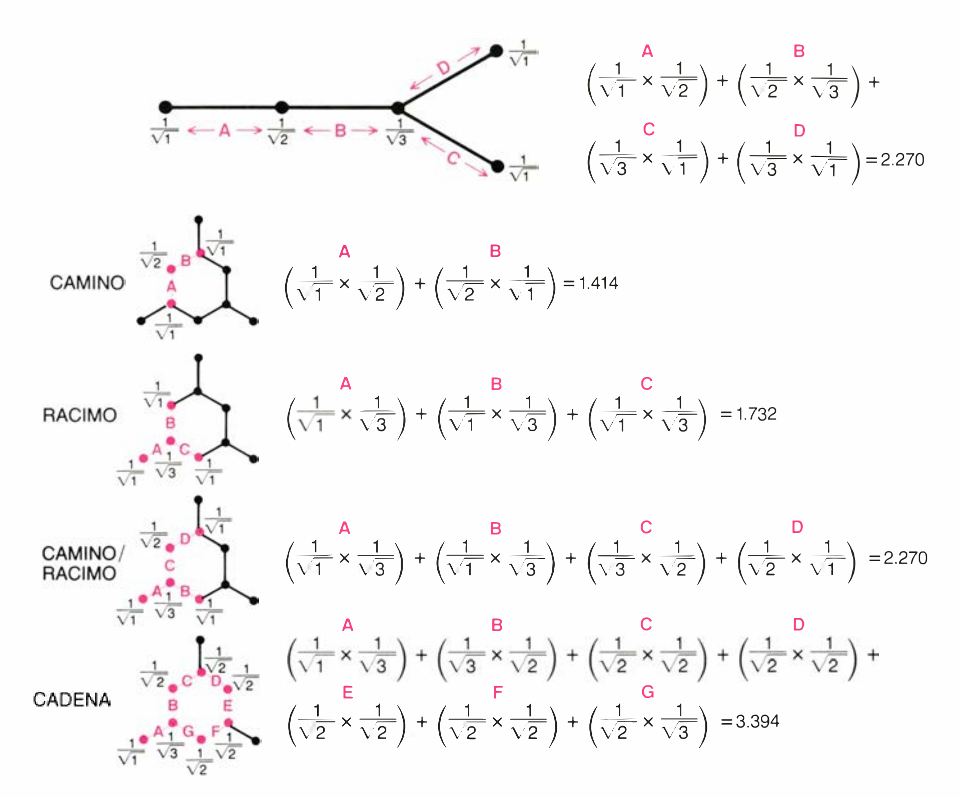
En los últimos años, el índice de

Wiener ha ido poniendo de manifiesto sus posibilidades, mucho más amplias. En este contexto, Ovanes Mekenyan, Danail Bonchev y Nenad Trinajstić, del Instituto Químico Superior de Bulgaria, demostraron, en 1979, que el índice de Wiener establecía perfectas correlaciones con las energías de los electrones de enlace en determinados tipos de moléculas complejas: las espiromoléculas (dotadas de dos o más anillos en planos perpendiculares entre sí con anillos adyacentes que comparten un mismo vértice) e hidrocarburos policíclicos aromáticos (hidrocarburos que poseen dos o más anillos hexagonales unidos, que comparten, al menos, una arista y yacen todos en el mismo plano).

Este resultado es muy importante, pues los niveles de energía de los electrones de enlace, de una molécula, son los responsables directos, en gran medida, del comportamiento químico de la misma. La correlación entre el índice de Wiener de una molécula y la energía de sus electrones de enlace posibilita la predicción de propiedades como la conductividad eléctrica, su afinidad electrónica (su tendencia a atraer otros electrones y, por tanto, a enlazarse con moléculas que poseen abundancia de electrones) y las longitudes de onda luminosa que absorberá. El índice de Wiener puede generalizarse a la predicción de las estabilidades relativas de compuestos desconocidos formados por moléculas todavía sin sintetizar.

La utilidad del índice de Wiener no se limita a moléculas pequeñas. Se ha reforzado de suerte que resulta aplicable incluso a sistemas potencialmente infinitos: polímeros (formados por unidades pseudomoleculares ligadas entre sí en largas cadenas) y cristales (sólidos tridimensionales constituidos por repetición de celdas unitarias idénticas). La formulación original del índice de Wiener, al aplicarse a un polímero de cadena infinita, debería tomar un valor infinito, pues habría un número infinito de trayectorias que unirían los átomos a lo largo de la cadena. En 1980, Bonchev y Mekenyan propusieron un método para modificar el número de Wiener a fin de que adquiriera valores finitos incluso en sistemas infinitos, siempre que éstos constaran de muchas unidades finitas e idénticas.

El planteamiento propuesto por Bonchev y Mekenyan produjo unas buenas estimaciones de algunas propiedades físicas y eléctricas de los polienos, polímeros capacitados para actuar como conductores eléctricos o semiconductores. Permitió, asimismo, realizar predicciones relativas al punto de fusión, punto de ebullición y otras propiedades fisicoquímicas de distintos polímeros, incluidos el politetrafluoroetileno, la policapramida y el polietilentereftalato.

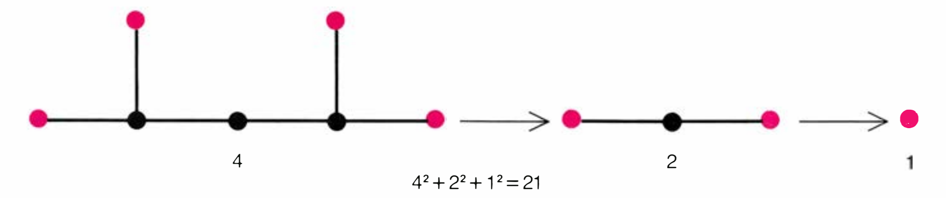


3. INDICES DE CONECTIVIDAD MOLECULAR DE RANDIC, propuesto por Milan Randić, de la Universidad de Drake. Pone mayor énfasis en la estructura que en el tamaño total, comparado con el índice de Wiener. Cada vértice posee un "grado": el número de vértices unidos a él. Análogamente, cada arista posee un "valor": el producto de los inversos de las raíces cuadradas de los grados de los vértices que une. El índice de Randić de una molécula es la suma de los valores de todas las aristas de la molécula. En algunos casos, se encuentran mejores correlaciones con el comportamiento químico si, en vez de atender a la molécula entera, nos centramos en fragmentos de la misma. Los métodos para obtener los índices de conectividad de cuatro tipos de fragmentos se muestran abajo. Los índices de conectividad son los que por el momento ofrecen un mayor número de aplicaciones. Admiten su uso en el desarrollo de nuevas drogas, en el cálculo de la toxicidad y difusión de contaminantes en el ambiente y en la predicción del sabor y aroma de nuevas sustancias.

La generalización del índice de Wiener facilita, también, la construcción de modelos de varios procesos en los que los átomos de un elemento rellenan zonas intersticiales de un cristal formado por otro elemento. Convendría saber entonces qué zonas intersticiales serán las ocupadas por los átomos extraños. Cuestión que cabe formularse en problemas de control de corrosión, de catálisis y de quimisorción (enlace de una sustancia en la superficie de otra). La idea fundamental que enhebra la solución es la siguiente: en general, un sistema se encuentra en su estado de mínima energía cuando su índice de Wiener alcanza un mínimo. El procedimiento indicado será, pues, calcular el índice de Wiener tridimensional de cada posible configuración de los átomos de la red cristalina y de los átomos extraños. Aquellas configuraciones con menores índices de Wiener serán las más probables.

El índice de Wiener de una molécula ofrece básicamente una medida del volumen de la misma, pero da también cierta idea de su estructura molecular. Un índice más sensible a la morfología fue introducido en 1975 por Milan Randić, hoy en la Universidad de Drake: se trata del índice de conectividad molecular. A juzgar por el número y diversidad de sus aplicaciones, este índice es, con mucho, el más valioso de los definidos hasta ahora.

Si el índice de Wiener se apoyaba en la noción topológica de distancia, el de Randić se funda en el concepto topológico de grado. El grado de cualquier vértice equivale al número de vértices a los que se halla unido. Para calcular el índice de Randić se asigna a cada arista un "valor", que depende de los grados de los vértices que dicha arista enlaza. Más concretamente, el valor asignado a cada arista es igual a la inversa de la raíz cuadrada del producto de los grados de sus dos vértices. El índice de Randić de una molécula es

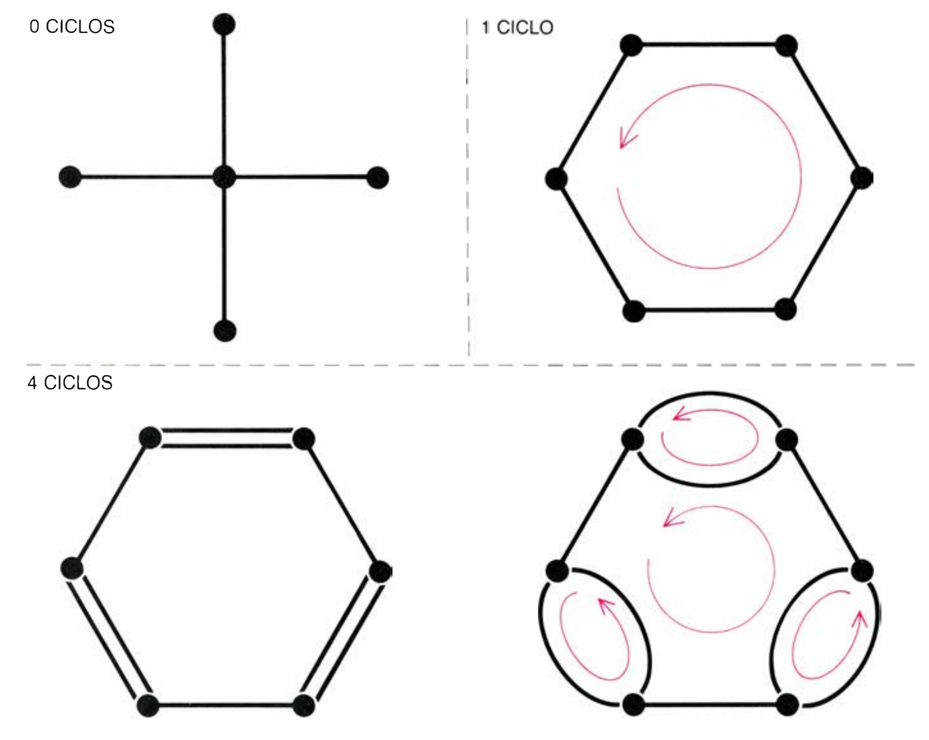


4. INDICE CENTRICO DE BALABAN, definido por Alexandru T. Balaban, de Bucarest. Pone de relieve el grado de ramificación de una molécula. Todos los vértices que están unidos a otro se cuentan y "podan" del grafo molecular; se eleva al cuadrado el número de vértices podados en cada paso y se suma el total. El proceso se repite hasta que cada vértice haya sido contado. La suma final es el índice de la molécula.

la suma de los valores de todas las aristas de la molécula.

Una vez que Randić propuso su índice de conectividad molecular, otros investigadores se dieron cuenta de que en algunos casos podían obtenerse mejores correlaciones centrando la atención en las partes componentes de la molécula. Por ejemplo, cierta propiedad podría correlacionarse con la suma de los índices de Randić de todos los racimos de una molécula (agrupaciones de tres átomos alrededor de otro átomo central) mejor que con el índice de Randić basado en cada arista del grafo molecular. Los índices de conectividad han conocido tal desarrollo, que resultan aplicables a subestructuras moleculares particulares que podrían desempeñar un papel destacado en la determinación de rasgos específicos del comportamiento. El índice de conectividad molecular de Randić es, por tanto, un verdadero conjunto de índices, cada uno aplicable en distintos casos.

Existen buenas correlaciones entre los índices de conectividad molecular y un amplio muestrario de propiedades físicas: densidad, solubilidad en agua y calor de evaporación. Y lo que es más importante, esos índices se correlacionan satisfactoriamente con un número mayor de propiedades biológicas. Desde hace tiempo se sabe que ciertas respuestas biológicas se desencadenan cuando una determinada molécula estimulante se acopla con un receptor en la superficie celular. En muchos casos, la forma específica de la molécula estimulante no importa tanto como su volumen o área superficial. Los índices de conectividad molecular manifiestan una notable correlación con el área superficial y el volumen: y, por tanto, con la capacidad para inducir determinadas respuestas biológicas.



5. NUMERO DE DEFICIENCIA DE HIDROGENO: equivale al número de ciclos independientes, o anillos, y dobles enlaces que presenta una molécula. El número de deficiencia de hidrógeno, multiplicado por un índice que mide el predominio relativo de cadenas abiertas y anillos cerrados, conduce a un nuevo índice; éste se correlaciona entonces con la cantidad de hollín producida al quemar moléculas de hidrocarburos.

Entre estas propiedades se encuentra la tendencia a actuar como anestésicos, narcóticos y alucinógenos. Se han establecido también correlaciones entre el olor de ciertas moléculas con sus índices de conectividad. El índice nos indicará si una substancia olerá como un éter, una flor o un ácido carboxílico (el principal componente del sudor humano). Asimismo, puede predecirse si una molécula tendrá sabor amargo o dulce, según su índice de conectividad se encuentre por encima o por debajo de determinado valor umbral. Ronald Gardner, en asociación con la empresa Harp Lager Ltd., ha explotado la capacidad de los índices de conectividad para distinguir entre sabores en la elaboración de nuevas cervezas.

Existe un amplio abanico de aplicaciones biológicas fundadas en los índices de conectividad. Se ha descubierto su correlación satisfactoria con el poder inhibidor de ciertas sustancias químicas sobre la reproducción de ciertos microorganismos (*Staphylococcus aureus, S. typhosa* y *Mycobacterium tuberculosis*). La capacidad de algunas sustancias para aniquilar la cepa Lee del virus *B* de la gripe manifiesta una buena correlación con los índices. Estos sirven de medida eficaz de la mutagenicidad (tendencia a provocar mutaciones genéticas) de algunos compuestos como las nitrosaminas, que se encuentran en el humo del tabaco, en comidas sazonadas de nitratos y en pescados ahumados.

Algunas de las aplicaciones más atractivas de los índices de conectividad molecular son las realizadas en estudios del ambiente. Ha quedado patente que los índices sirven para predecir la toxicidad de algunos compuestos en ciertos organismos de agua dulce. Y lo que es más importante, se correlacionan satisfactoriamente con la capacidad de difusión de algunas sustancias contaminantes del aire, agua o suelo, con su concentración en el cuerpo de organismos o con su tránsito de uno de estos compartimentos ambientales a otro. Resulta a menudo difícil y caro comprobar físicamente tales propiedades; ahora bien, para realizar una predicción utilizando índices apenas si se necesita poco más que una calculadora de bolsillo. La Oficina de Protección Animal de los Estados Unidos ha comenzado a aplicar los índices a la predicción del potencial tóxico de contaminantes desconocidos o no experimentados y otros problemas afines.

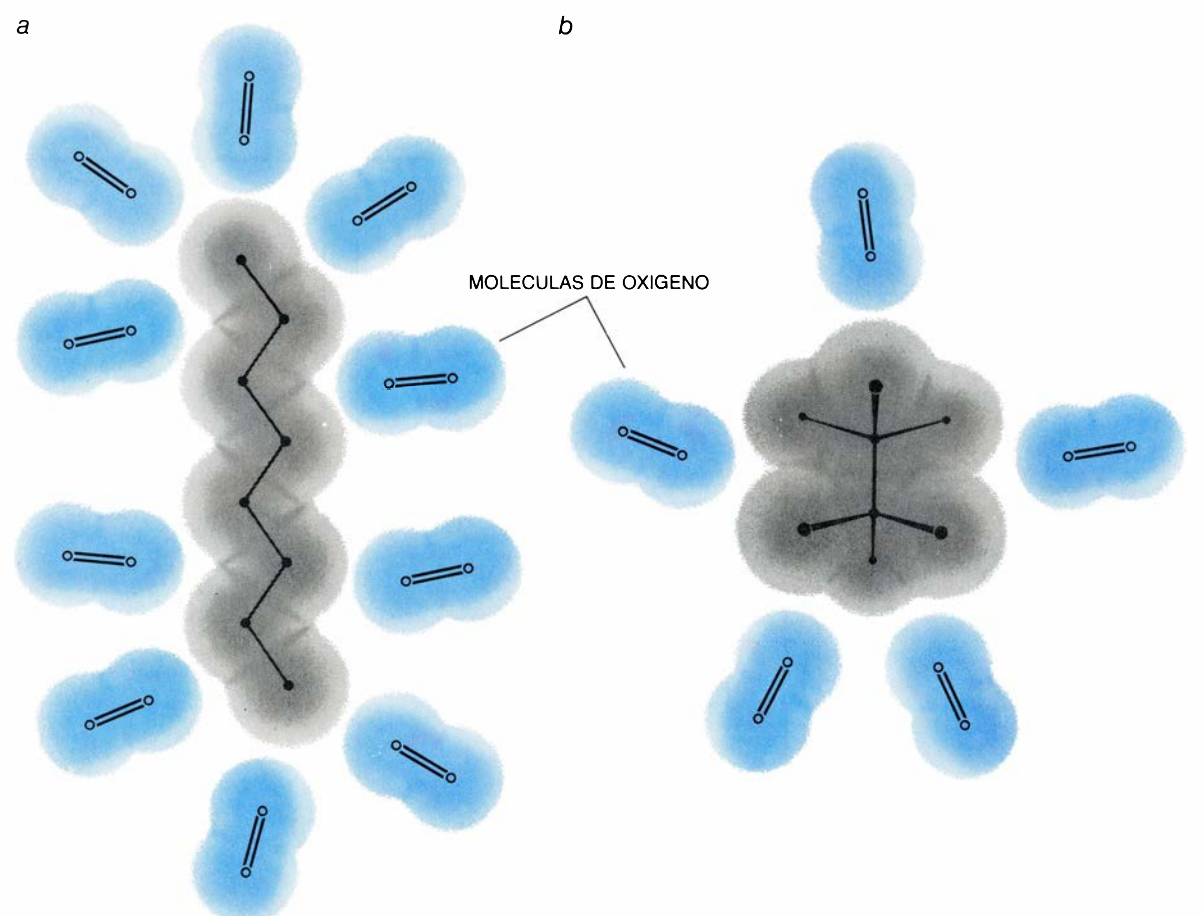
Aunque los índices de Wiener y Ran-

a

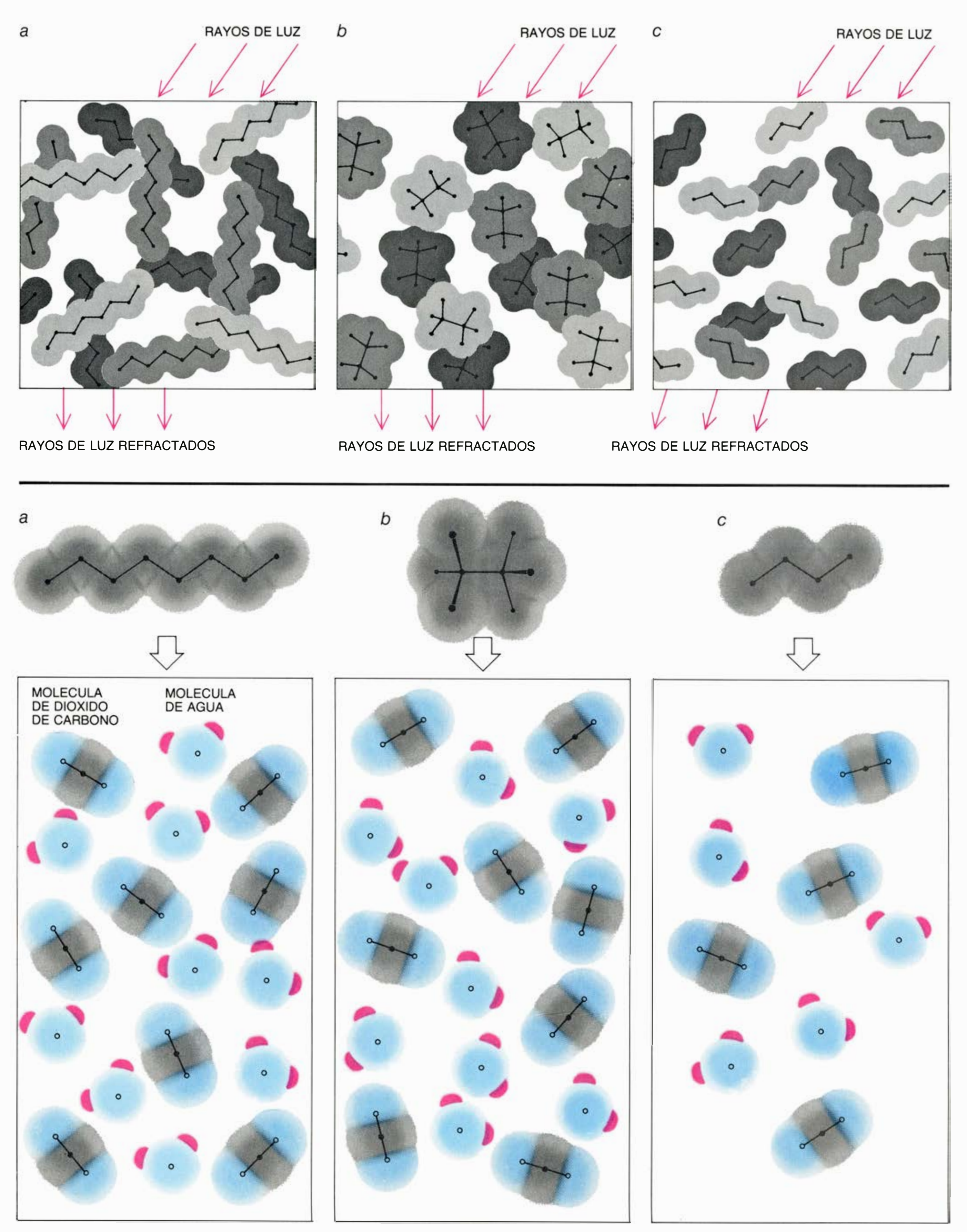
b

FUERZAS
INTERMOLECULARES

FUERZAS
INTERMOLECULARES



6. PROPIEDADES DEPENDIENTES DE LA MORFOLOGIA de una molécula son, por ejemplo, el punto de ebullición y el octanaje. El punto de ebullición (*arriba*) depende de la forma porque está determinado por fuerzas intermoleculares: cuanto más intensas sean las fuerzas de atracción entre las moléculas de un líquido, mayor será el punto de ebullición. Las moléculas de cadena lineal (*a*) interaccionan con las otras más fuertemente que las moléculas ramificadas (*b*), ya que las lineales presentan más superficie de interacción. El número de octanos de un combustible (*abajo*) mide su tendencia a no "picar" (combinarse con oxígeno) mientras se está comprimiendo, antes de producirse la ignición. A lo largo de una molécula lineal (*a*) existen muchas zonas donde una molécula de oxígeno colisionante podría atacar. En las moléculas ramificadas (*b*) hay zonas protegidas en el interior de las cavidades formadas por la estructura ramificada. Las moléculas ramificadas poseen mejores propiedades contra el riesgo de picado. Los índices sensibles a la forma se correlacionan con esas propiedades.



7. PROPIEDADES QUE DEPENDEN DEL TAMAÑO de una molécula son, entre otras, la refracción molar y el calor de combustión. La refracción molar de una sustancia nos indica cuánto desvía ésta un rayo de luz (*arriba*). La refracción molar depende del número de electrones que en cada molécula interactúan con los rayos de luz incidentes. Las moléculas grandes (*a, b*) poseen más electrones y desvían más luz que las pequeñas (*c*). El calor de combustión de un hidrocarburo es la cantidad de energía calorífica liberada cuando las moléculas se combinan con oxígeno para formar agua y dióxido de carbono (*abajo*). Por cada molécula de agua o de dióxido de carbono se libera cierta cantidad de calor; así pues, las moléculas mayores de hidrocarburos, que al quemarse dan lugar a más moléculas de productos (*a, b*), tienen calores de combustión mayores que los hidrocarburos menores (*c*). Los índices se relacionan con estas propiedades.

dić son aplicables a problemas muy dispares, se dan situaciones en las que no producen buenas correlaciones. En esos casos, no suele ser infrecuente desarrollar un índice específico, que sirva para el problema considerado. Se recurre a tales índices especializados cuando factores distintos del tamaño y morfología intervienen de manera decisiva en el comportamiento químico.

Una aplicación en la que se requiere un índice especializado es la predicción del octanaje de un combustible. El octanaje, que generalmente se determina en un motor de pruebas siguiendo una normativa, nos revela el rendimiento del consumo del combustible: su tendencia a no "picar". Un combustible pica si los átomos de oxígeno se combinan con el combustible cuando se está comprimiendo, antes de haberse producido la ignición. Las moléculas de la cadena lineal suelen ser más susceptibles de picar que las moléculas ramificadas, debido a que en las cadenas lineales todos los átomos pueden colisionar con moléculas de oxígeno, mientras que en las moléculas ramificadas muchos átomos están protegidos en las cavidades formadas por la estructura ramificada.

Por hallarse la tendencia de las moléculas a no picar estrechamente relacionada con su grado de ramificación, varias investigaciones se han encaminado hacia la correlación entre octanaje e índices más usados, el de Wiener entre ellos, que dan cierta idea de la forma y del volumen. Se han obtenido ya buenas correlaciones siguiendo este método, pero muchos estudiosos pensaron que un índice que insistiera explícitamente en la ramificación de las moléculas se correlacionaría mejor. En 1979, Alexandru T. Balaban, del Politécnico de Bucarest, definió un índice al que llamó índice céntrico, que manifestaba una óptima correlación con el número de octanos de un combustible de moléculas de hidrocarburos.

El índice céntrico de Balaban se obtiene por un proceso iterativo, "podando" el grafo de la molécula sometida a estudio [*véase la figura 4*]. En el primer paso del proceso se cuentan todos los vértices del grafo que están unidos solamente a otros vértices; se torna a dibujar el grafo sin ellos. El número de vértices "podados" o eliminados se eleva al cuadrado, y el resultado se suma al total. El proceso se repite hasta que, tras sucesivas podas, se acaba el grafo. El total final (es decir, la suma de los cuadrados de los vértices eliminados en cada paso) es el índice céntrico de Balaban para esa molécula.

Se creó otro índice especializado para predecir la cantidad de hollín producido al quemar una molécula de hidrocarburo. Establecer la correlación de la estructura molecular con la producción de hollín no fue fácil. Indices topológicos sencillos, como el número de carbonos, conducen a buenas correlaciones para moléculas de una misma familia (es decir, para aquellas que poseen estructuras similares y comportamientos parecidos), pero no son de fiar al comparar el hollín producido por moléculas de familias distintas.

A comienzos de este mismo año, Milton P. Hanson y el autor trataron de definir un índice que correlacionara la producción de hollín en el seno de cada familia particular y entre diferentes familias. No tardamos en advertir que esta tarea requería un índice capaz de distinguir entre las moléculas que poseyeran átomos trabados por dobles enlaces o anillos de átomos y las que carecieran de ellos. Encontramos finalmente una solución combinando dos índices de bastante sencillez. Uno de ellos, conocido como número de deficiencia de hidrógeno, mide el número de ciclos independientes (anillos) en el grafo molecular [*véase la figura 5*]. El otro, llamado índice de conectividad de suma de distancias promediadas, mide el predominio relativo de cadenas abiertas y anillos cerrados en el interior molecular. Nuestro índice, producto de los dos anteriores, ofrece una sencilla correlación lineal con la producción de hollín para un centenar de moléculas de hidrocarburos.

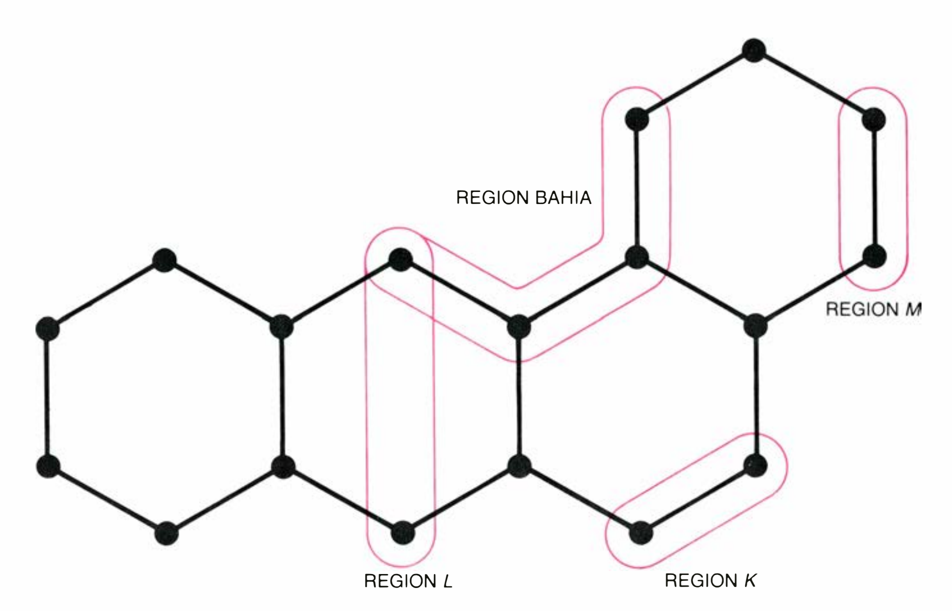
Uno de los más ambiciosos proyectos para sacarle partido a la predicción topológica lo encontramos en el esfuerzo, reciente, puesto en correlacionar el comportamiento oncogénico de distintas moléculas con los índices. Puesto que en la génesis del cáncer intervienen varias etapas, un índice adecuado debería alcanzar la finura necesaria para reflejar no sólo las interacciones químicas de la molécula original, sino también las de aquellas moléculas formadas como productos de las reacciones iniciales. Aunque el índice de conectividad de Randić puede usarse para predecir si una determinada molécula será cancerígena o no, los mejores resultados obtenidos en la predicción de la potencia oncogénica de una molécula débense a William C. Herndon y László von Szentpály, de la Universidad de Texas en El Paso, que

dieron con una ingeniosa combinación de índices simples con la que describir la potencia oncogénica de los hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Punto importante en la predicción de la potencia oncogénica de estas moléculas es el relativo al umbral: si se encuentran por encima o debajo de ciertos límites en el tamaño tienden a perder ese carácter tumorígeno. A partir de su modelo matemático, Herndon y Szentpály han tenido en cuenta estas limitaciones tomando, por índices de correlación, el número de carbonos y su cuadrado. Otra consideración a retener es que ciertas zonas de los hidrocarburos policíclicos revisten mayor relevancia que otras desde el punto de vista cancerígeno. Estas zonas, conocidas como regiones bahía, *K, L* y *M*, son de interés por lo menos en las reacciones iniciales de la cadena cancerígena. Las regiones bahía, *K* y *M* deben mostrarse bastante activas y la región *L* relativamente inactiva para que la molécula sea cancerígena. El modelo de Herndon y Szentpály adquiere la forma de una ecuación que contiene cuatro índices topológicos, dos de los cuales se refieren al tamaño de la molécula y otros dos a la presencia de ciertas estructuras características (relacionadas con las regiones bahía *K, L* y *M*) en la molécula. Su ecuación ha dado excelentes correlaciones con mediciones experimentales de la potencia cancerígena, aunque dichas mediciones estaban sujetas a no pocas imprecisiones.

Los índices topológicos permiten construir modelos de una increíble variedad de fenómenos físicos, químicos y biológicos. Pueden estimar el comportamiento de gases, líquidos y sólidos, trátese de especies inorgánicas u orgánicas. Si bien no es posible todavía adelantar con plena seguridad qué índice será el más adecuado en una aplicación particular, se van conociendo ya varios por su buen comportamiento para describir tamaños, formas, ramificaciones, reactividades y un largo etcétera de características más. En particular, dos áreas donde los índices parecen tener un gran futuro son la elaboración de nuevas drogas y el trazado del comportamiento de sustancias contaminantes en el ambiente, así como en la construcción de un modelo matemático que dé cuenta de sus efectos sobre los organismos.

Sólo en los últimos años han comenzado a apreciarse en todo su valor los índices topológicos; en varias áreas se alcanza ya un nivel de aceptación general. Sabemos de la validez de los índices; falta tan sólo utilizarlos. Cuando ello ocurra, aparecerá una nueva serie de paradigmas químicos. Y podremos entonces aventurarnos en predicciones químicas fiables y útiles de forma rutinaria, apoyándonos en alguno de los parámetros más sencillos, fundamentales y a menudo despreciados. Habrá llegado la era de la topología molecular.



8. POTENCIA ONCOGENICA de una molécula. Hay casos en que puede predecirse topológicamente. En los hidrocarburos formados por varios anillos unidos y situados en un mismo plano, ciertas regiones, conocidas como regiones bahía, *K*, *L* y *M* son importantes en las reacciones químicas que ocurren en las sucesivas etapas de la carcinogénesis. La ecuación, que contiene diversos índices, formulada por William C. Herndon y László von Szentpály, tiene en cuenta el predominio de estructuras características que pueden definirse en función de estas regiones. La correlación obtenida depende, asimismo, del tamaño de las moléculas estudiadas; las moléculas con tamaños superiores o inferiores a cierto umbral establecido no son cancerígenas.

Supercuerdas

Si todas las partículas elementales se consideran cuerdas, aparece una teoría cuántica coherente que explica las cuatro fuerzas fundamentales. Esta teoría podría transformar las ideas aceptadas acerca del espacio y el tiempo

Michael B. Green

La paradoja central de la física contemporánea de las partículas elementales reside en la aparente incompatibilidad de sus dos principales fundamentos teóricos: la relatividad general de Einstein y la mecánica cuántica. La teoría de la relatividad general de Einstein relaciona la fuerza de la gravedad con la estructura de espacio y tiempo. Este punto de vista sobre la gravedad ha llevado a la creación de modelos de los fenómenos a escala cósmica y ha permitido conocer la evolución del universo. El segundo fundamento teórico, la mecánica cuántica, explica el mundo atómico y subatómico. Se han formulado teorías cuánticas para tres de las cuatro fuerzas conocidas en la naturaleza: las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas. Hasta hace poco, parecía haber pocas esperanzas de que la teoría de Einstein de la gravitación –la cuarta fuerza fundamental– pudiera unirse con los preceptos de la mecánica cuántica. La dificultad básica estribaba en que tal unificación exigía una formulación radicalmente nueva de las leyes de la física a escalas mínimas de distancia; en una tal reformulación, la idea de que el espacio y el tiempo son conjuntos continuos de puntos debería abandonarse. Sin una teoría cuántica de la gravitación y las revisiones conceptuales que dicha teoría implica, no puede alcanzarse una descripción global de todas las fuerzas de la naturaleza.

En los dos últimos años, los físicos de partículas elementales se han vuelto optimistas acerca de la posibilidad de salir del atolladero. El optimismo se basa en los impresionantes avances de una nueva clase de teoría: las supercuerdas. En la teoría de supercuerdas, como en cualquier otra teoría de cuerdas, las partículas elementales se asemejan a cuerdas. Las teorías de cuerdas se diferencian, por tanto, de todas las teorías de campos mecánico-cuánticos, que nos son familiares; verbigracia, la teoría cuántica del electromagnetismo, cuyos cuantos, o partículas constituyentes, son puntiformes. En virtud de su extensión, las cuerdas vibran como si fueran cuerdas de violín. Los modos de vibración armónicos, o normales, dependen de la tensión de la cuerda. En mecánica cuántica, las ondas y partículas son aspectos duales de un mismo fenómeno; así, cada modo de vibración de una cuerda corresponde a una partícula. La frecuencia de vibración del modo determina la energía de la partícula y, por tanto, su masa. Las partículas elementales usuales corresponden a diferentes modos de una sola cuerda.

La teoría de supercuerdas combina la teoría de cuerdas con una estructura matemática llamada supersimetría (véase "¿Es supersimétrica la naturaleza?", de Howard E. Haber y Gordon L. Kane; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1986). La teoría de supercuerdas no sólo evita los viejos problemas de combinar la gravedad con la mecánica cuántica, sino que, en ese proceso, la teoría permite también considerar las cuatro fuerzas fundamentales como aspectos diversos de un solo principio subyacente. Además, la unificación de las fuerzas se logra de una manera casi unívocamente determinada por el precepto lógico de coherencia interna que debe ofrecer toda teoría. Estos avances han conducido a una extraordinaria revitalización de las relaciones entre matemática y física. Muchos de los descubrimientos más profundos de la matemática contemporánea contribuyen a la comprensión de la teoría; a su vez, las teorías de cuerdas plantean nuevos problemas a la matemática.

Según las teorías de supercuerdas, las leyes de la física son versiones aproximadas de otra teoría, mucho más rica, que tiene en cuenta la estructura de la materia a una escala de distancias pequeñísima. Las cuerdas postuladas por la teoría miden unos 10^{-35} metros de longitud, es decir, unas 10^{20} veces menos que el diámetro del protón. Las diferencias, a estas minúsculas escalas, entre las teorías de supercuerdas y las teorías convencionales resultan decisivas para la coherencia interna y el poder predictivo de la teoría.

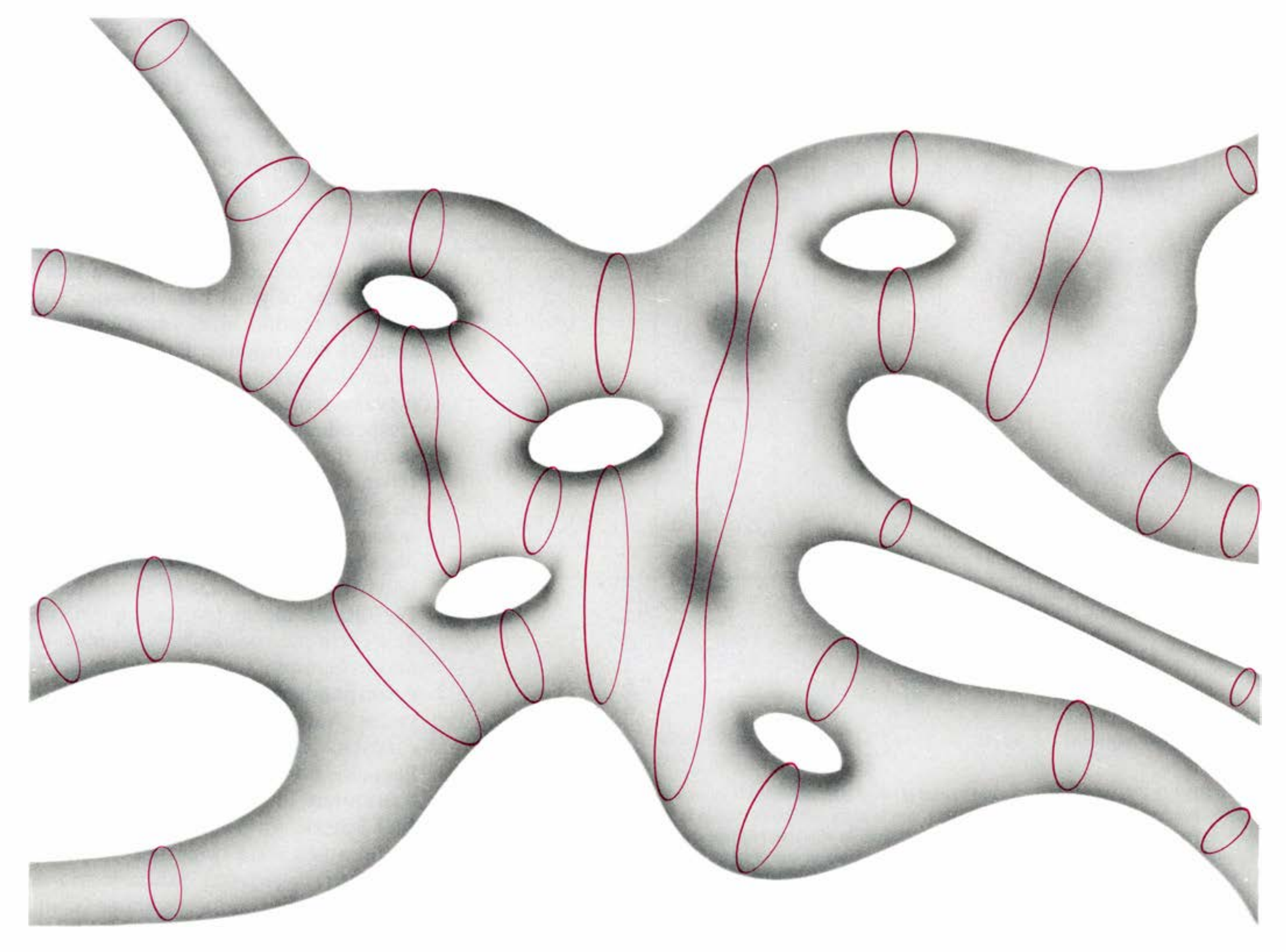
Si prescindimos de la gravedad, nos es posible construir una imagen unificada de las fuerzas fuertes, débiles y electromagnéticas en una teoría de campos ordinaria con cuantos puntiformes. La imagen unificada resulta de la simetría subyacente introducida en la teoría. Pero hay muchas simetrías subyacentes posibles y no existe razón teórica para preferir una u otra. En cambio, en las teorías de supercuerdas la gravedad no puede excluirse, y la clase de simetría necesaria para su inclusión en la teoría conduce a una predicción natural acerca de la simetría subyacente que unifica las tres fuerzas restantes.

Desde hace tiempo se venía esperando que la teoría cuántica de la gravitación aportase nuevas ideas sobre el espacio y el tiempo; pues bien, la teoría de supercuerdas puede cambiar nuestra concepción de la geometría del universo. Hablando estrictamente, no es correcto imaginar las cuerdas como partículas independientes moviéndose en algún espacio fijo de referencia, o de fondo. En la teoría de la gravitación de Einstein, a la que la teoría de supercuerdas debe acercarse, el espacio y el tiempo se unifican en un continuo tetradimensional llamado espacio-tiempo. La influencia de la fuerza gravitacional viene determinada por la curvatura del espacio-tiempo, análoga a la curvatura de una superficie bidimensional (la de una esfera, por ejemplo). La partícula se mueve a lo largo de una geodésica, o trayectoria más corta, en el espacio-tiempo curvado; sobre la esfera, el análogo a tal trayec-

toria es el círculo máximo entre dos puntos. La partícula ejerce una influencia recíproca sobre el espacio-tiempo, provocando ondas gravitatorias que perturban las propias geodésicas a lo largo de las cuales se mueve la partícula. Las ecuaciones de la relatividad general no sólo determinan las trayectorias de las partículas, sino también la estructura del espacio-tiempo en la que éstas se mueven.

En la teoría de supercuerdas, la gravedad se define en un mundo ampliado a nueve dimensiones espaciales más el tiempo: en total, 10 dimensiones. De nuevo, el movimiento se desarrolla a lo largo de las geodésicas, pero éstas son ahora superficies de área mínima en 10 dimensiones. Evidentemente, seis de las 10 dimensiones deben quedar ocultas, dejando observables sólo las cuatro familiares del espacio y el tiempo. Las seis dimensiones restantes deben curvarse sobre sí mismas para formar una estructura tan pequeña que se escape a la visión directa. Entenderemos sin mayor dificultad la idea de dimensiones inobservablemente pequeñas si nos apoyamos en una sencilla analogía bidimensional. Un tubo es una superficie bidimensional que aparenta tener una sola dimensión cuando se le mira a una escala poco precisa e incapaz de distinguir su grosor. En la teoría de supercuerdas es probable que el tamaño de las seis dimensiones curvadas sea aproximadamente el mismo que la longitud de la cuerda. El mundo parece tener tres dimensiones espaciales en que la cuerda actúa como una partícula puntual.

La ampliación de la idea de geometría no se limita a añadir seis dimensiones espaciales. En la relatividad general ordinaria, se define un campo gravitatorio en cada punto del espacio-tiempo. La equivalencia de ondas y partículas en mecánica cuántica exige que una onda gravitatoria, o perturbación del campo gravitatorio, se identifique con una partícula; tal partícula recibe el nombre de gravitón. Análogamente, debe haber en teoría de cuerdas un campo que dependa de las configuraciones de la cuerda; se trata del "campo de cuerda". El número de posibles configuraciones de una cuerda en el espacio es mucho mayor que el número de puntos en el espacio. El campo de cuerdas debe estar relacionado, pues, con una nueva clase de geometría en una ampliación enorme de la idea de espacio, definida por to-



1. HOJA DE UNIVERSO, barrida por partículas en forma de cuerdas cuando éstas se mueven e interactúan en el espacio-tiempo. Una partícula en forma de cuerda, a semejanza de un cordel común, sólo tiene extensión en una dimensión. En la teoría de supercuerdas, las cuerdas son pequeñísimas y se mueven en un análogo de espacio y tiempo de 10 dimensiones. En la figura superior, el tiempo es el eje horizontal; las cuerdas cerradas, o bucles (*en color*), llegan por la izquierda y se van por la derecha. Las cuerdas cerradas barren hojas de universo que son cilindros deformados, es decir, equivalen, desde el punto de vista topológico, a un cilindro. Los diagramas correspondientes para procesos con cuerdas abiertas resultan algo más complicados, debido a que las superficies presentan fronteras dibujadas por los extremos de la cuerda. Cuando dos cuerdas colisionan, se unen para formar una tercera: dos cilindros integran un tercer cilindro. Cuando las cuerdas se separan y se vuelven a unir, queda un agujero en la hoja de universo. En los cálculos cuánticos, deben considerarse todos los posibles desdoblamientos y uniones entre un estado inicial de cuerdas y un estado final. La estructura topológica de la hoja de universo que describe estas interacciones mecánico-cuánticas es como la de una rosquilla ("donut") con un número arbitrario de agujeros. Las propiedades de la teoría de supercuerdas para tales hojas de universo, objeto hoy de intensa investigación, guardan una estrecha relación con varios temas importantes de las matemáticas contemporáneas.

das las posibles configuraciones de una cuerda. Habrá que imaginarse, por tanto, la partícula de tipo cuerda como una perturbación "ondulatoria" en este espacio enorme, igual que el gravitón es una onda en el espacio ordinario.

El origen histórico de la teoría de supercuerdas tiene que ver con el modelo de las resonancias duales, teoría ésta que se desarrolló a finales de los años sesenta para explicar las propiedades observadas en los hadrones, es decir, en las partículas sometidas a la interacción fuerte. Aunque en aquella época se había construido ya una teoría de campos cuánticos de enorme éxito para el electromagnetismo, a muchos físicos teóricos no acababa de ilusionarles el rumbo que tomaba la teoría de campos cuánticos. Ninguna teoría de este tipo parecía capaz de explicar el comportamiento de las interacciones fuertes de los hadrones dotados de un gran espín (momento angular cuantificado).

Así estaban las cosas, cuando Gabriele Veneziano, actualmente en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, intuyó una fórmula, independiente de las propias de la teoría cuántica de campos, que expresaba muchos rasgos de las interacciones de los hadrones. Luego, Yoichiro Nambu, de la Universidad de Chicago, T. Goto, ya fallecido, Holger B. Nielsen, del Instituto Niels Bohr de Copenhagen, y Leonard Susskind, de la Universidad de Stanford, demostraron que la aplicación de la fórmula de Veneziano equivalía a describir los hadrones como cuerdas. Se proponía así que los armónicos de las vibraciones de la cuerda correspondían a los hadrones observados. De manera aproximada, podría decirse que las cuerdas servían para mantener ligados los quarks que constituían el protón, el neutrón y los otros hadrones.

El modelo original de resonancias duales sólo podía explicar partículas tales como el mesón pi, cuyo espín, en unidades fundamentales, es entero. Los bosones, con ese nombre se conoce a tales partículas, se distinguen, en mecánica cuántica, de los fermiones (piénsese en el electrón y el protón), cuyo espín es semientero. En 1971, Pierre M. Ramond, de la Universidad de Florida, André Neveu, de la Escuela Normal Superior de París, y John H. Schwarz, del Instituto de Tecnología de California, desarrollaron una variante de la teoría original que incluía fermiones. La variante, denominada teoría de la cuerda girante, fue la precursora de las teorías supersimétricas.

Por desgracia, resultó que las dos primitivas teorías de cuerdas presentaban ciertas características que en aquel tiempo se consideraron inconvenientes serios. En primer lugar, el comportamiento mecánico-cuántico de la teoría de cuerdas original para bosones sólo adquiría sentido si el espacio-tiempo tenía 26 dimensiones. Para la teoría de la cuerda girante, y también para las actuales teorías de supercuerdas, el correspondiente número de dimensiones es de 10. Además, las teorías presentaban el problema de que los estados de menor energía de la cuerda eran taquiones, partículas que viajan más deprisa que la luz. Una teoría cuántica relativista con taquiones es incoherente. Por último, dichas teorías requerían la existencia de partículas carentes de masa, de espín 1 y 2, las cuales no se correspondían con los hadrones observados. Antes bien, sus propiedades recordaban las del fotón, el gravitón y los llamados bosones de aforo débiles que transmiten la fuerza débil. Aunque Joël Scherk, un físico excepcional que murió a una edad trágicamente joven, y Schwarz sugirieron que la teoría de cuerdas podría reinterpretarse como una teoría de la gravitación y de las otras fuerzas, las incoherencias internas de la teoría en cuestión parecían insuperables.

A principios de los años setenta, se asistió al resurgimiento del interés por las teorías de campos cuánticos basadas en partículas puntuales. Hace tan

FERMIONES

GENERACION	SIMETRIA $SU(3)$ DE LA CROMODINAMICA CUANTICA FERMIONES CON CARGA DE COLOR (QUARKS)			FERMIONES SIN CARGA DE COLOR (LEPTONES)
1 SIMETRIA ELECTRODEBIL $SU(2) \times U(1)$	$[u\ d]_I$ u_D d_D	$[u\ d]_I$ u_D d_D	$[u\ d]_I$ u_D d_D	$[\nu_e\ e^-]_I$ e^-_D
2 SIMETRIA ELECTRODEBIL $SU(2) \times U(1)$	$[c\ s]_I$ c_D s_D	$[c\ s]_I$ c_D s_D	$[c\ s]_I$ c_D s_D	$[\nu_\mu\ \mu^-]_I$ μ^-_D
3 SIMETRIA ELECTRODEBIL $SU(2) \times U(1)$	$[t\ b]_I$ t_D b_D	$[t\ b]_I$ t_D b_D	$[t\ b]_I$ t_D b_D	$[\nu_\tau\ \tau^-]_I$ τ^-_D

BOSONES

BOSONES DE AFORO ELECTRODEBILES	γ	W^+	W^-	Z^0
BOSONES DE AFORO FUERTES (GLUONES)				
BOSONES DE HIGGS (?)	H	H ...		

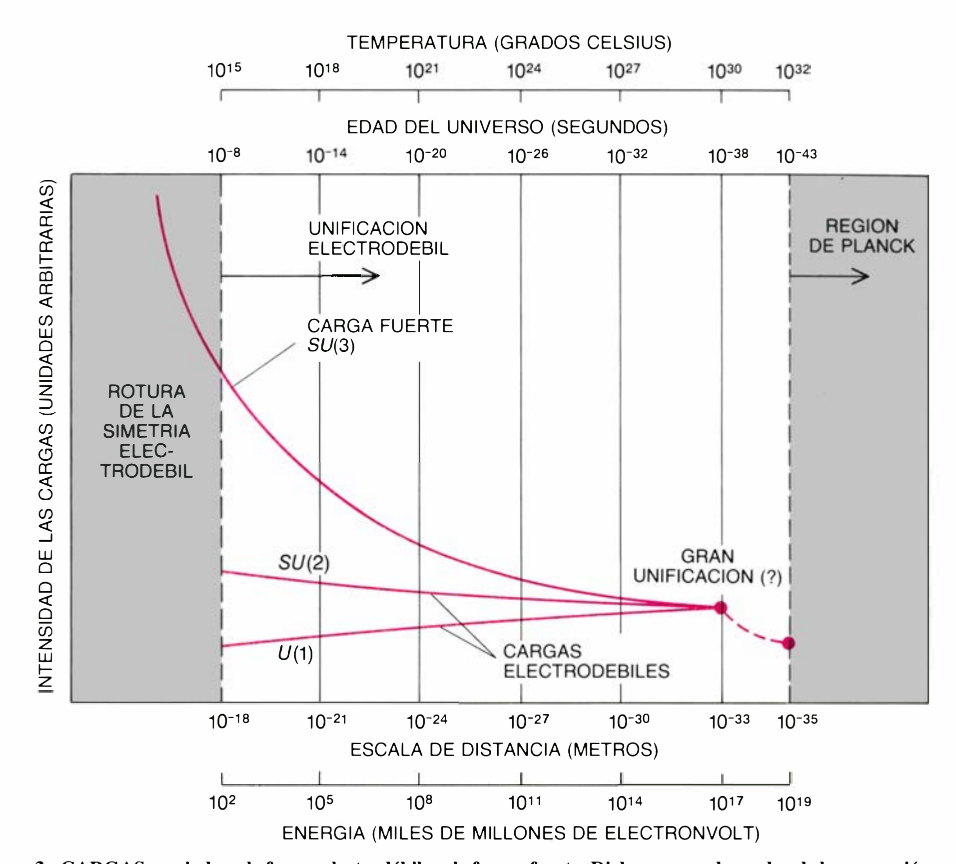
2. MODELO ESTANDAR de las partículas elementales: combina la cromodinámica cuántica (QCD), que es la teoría de la fuerza de "color", o fuerte, con la teoría electrodébil. En la teoría de supercuerdas, todas estas partículas surgen como estados de masa cero de la vibración de una cuerda. En la tabla, los fermiones se ordenan en tres "generaciones" de partículas. El agrupamiento muestra la simetría de la teoría subyacente, de manera parecida a como la seriación de los elementos químicos en la tabla periódica de Mendeleev manifiesta la simetría subyacente en la física atómica. Los fermiones incluyen los quarks, que llevan alguna de las tres cargas de color asociadas al grupo de simetría $SU(3)$ de la QCD, y los leptones, que carecen de carga de color. Las cargas de color se representan aquí en rojo, verde y azul. Los quarks presentan "sabor" electrodébil, asociado al grupo de simetría $SU(2) \times U(1)$; se conocen seis sabores, representados por las letras *u, d, s, c, b* y *t*. Los leptones sólo están sujetos a la fuerza electrodébil. Los leptones son el neutrino electrónico (ν_e), el electrón (e^-), el neutrino muónico (ν_μ), el muón (μ^-), el neutrino tauónico (ν_τ) y el tau (τ^-). Los bosones de aforo transmiten las fuerzas. Los bosones de aforo electrodébiles son el fotón (γ) y las tres partículas masivas W^+, W^- y Z^0. Ocho bosones de aforo fuertes, o gluones, transportan cargas de color y cargas de anticolor, indicadas en colores sólidos o en contornos de color. Puede haber también bosones de Higgs, responsables de la masa no nula de las partículas. Los subíndices *L* y *R*, izquierda ("left") y derecha ("right"), señalan la quiralidad. Para cada partícula, excepción hecha de los neutrinos, existe una antipartícula de orientación opuesta. La asimetría izquierda-derecha, que se observa principalmente en la ausencia de neutrinos dextrógiros, evidencia que la interacción débil distingue entre las partículas en razón de su quiralidad.

sólo 20 años, la única teoría de campos cuánticos con éxito era la teoría cuántica del electromagnetismo, antes mencionada, conocida por electrodinámica cuántica, o QED. Pero no pasaría mucho tiempo antes de que se desarrollaran dos teorías de campos cuánticos más, de enorme éxito: la teoría electrodébil, que proporciona una descripción unificada del electromagnetismo y la interacción débil, y la cromodinámica cuántica, o QCD, que describe la unión entre quarks para formar los hadrones. Estos logros teóricos se confirmaron con importantes descubrimientos experimentales.

En todas estas teorías, el papel de la simetría es fundamental. La idea de la simetría en las leyes de la física se expresa mediante un conjunto de transformaciones que integran la estructura matemática conocida por grupo. En este sentido, las leyes físicas que gobiernan el comportamiento de un aparato no dependen de su orientación en el espacio; se dice que las leyes son simétricas bajo las rotaciones en torno a cualquiera de los tres ejes espaciales independientes. Todas estas rotaciones pertenecen al grupo de rotaciones tridimensionales, denominado $O(3)$; como las rotaciones se especifican mediante ángulos continuos, el grupo es un grupo de simetría continuo. Sucede que, para cada simetría continua de la física, existe una cantidad, o carga, conservada. La simetría continua de las rotaciones en el espacio produce la conservación del momento angular.

Muchas simetrías de la física de partículas no están relacionadas con el espacio ordinario; al abordarlas, se las considera relacionadas con algún espacio llamado interno. En la teoría electromagnética de Maxwell, por ejemplo, el espacio interno se contempla como un círculo. Los fenómenos físicos son independientes de las rotaciones alrededor del círculo, igual que lo son respecto de las rotaciones en el espacio. La cantidad conservada asociada a la simetría constituye la carga eléctrica.

Las teorías de campos de mayor riqueza e interés son aquellas en las que puede haber transformaciones de simetría independientes en cada punto del espacio y el tiempo. Tales simetrías se denominan simetrías de aforo; y las teorías que las implican, teorías de aforo. El primer ejemplo de una teoría de aforo, el más sencillo también, vuelve a ser la teoría de Maxwell del electromagnetismo. A cada punto del espacio-tiempo se le asocia un círculo; las leyes del electromagnetismo



3. CARGAS asociadas a la fuerza electrodébil y a la fuerza fuerte. Dichas cargas dependen de la separación entre las partículas que las portan. La teoría cuántica conduce a fluctuaciones de energía que se manifiestan cual un mar de partículas "virtuales" en todo el espacio. Las partículas virtuales llevan cargas que pueden apantallar las partículas aisladas, causando, por consiguiente, la variación en la intensidad de las cargas. Las otras tres coordenadas horizontales indican maneras equivalentes de entender la variación. Si uno extrapola desde los valores medidos de las cargas a una energía de 100 GeV (100.000 millones de electronvolt), las tres cargas parecen igualarse en intensidad a unos 10^{17} GeV. La extrapolación sugiere que una simetría mayor, de "gran unificación", prevalece por encima de dicha energía, a la que las fuerzas electrodébiles y fuertes se hacen indistinguibles. Sin embargo, la energía de gran unificación podría coincidir con la energía de la escala de Planck (10^{19} GeV), en cuyo caso la fuerza de la gravedad no puede ya despreciarse.

no se alteran cuando se hacen rotaciones independientes en torno a cada uno de los círculos de este conjunto infinito. Esta simetría de aforo se expresa mediante un grupo de simetría denominado $U(1)$.

En cualquier teoría de aforo, hay un conjunto de partículas de aforo que transmiten la fuerza entre las partículas portadoras de carga. En electrodinámica, la partícula de aforo carece de masa y posee espín 1: el fotón. Las teorías de aforo más generales, con mayor simetría interna, así la teoría electrodébil y la QCD, contienen también partículas de aforo sin masa y de espín 1. Reciben el nombre genérico de teorías de Yang-Mills, en honor de C. N. Yang, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y Robert L. Mills, de la Universidad estatal de Ohio. Las fuerzas descritas por las teorías de Yang-Mills ("fuerzas de Yang-Mills") no son gravitatorias. Por último, la propia teoría de Einstein de la gravitación es una clase de teoría de aforo, pero el espín de su partícula de aforo, el gravitón, es 2.

Aspecto importante de una simetría es que puede estar rota. La presencia de una simetría espontáneamente rota señala el cambio de estado conocido por transición de fase de un sistema de partículas. Imaginemos un pedazo de hierro a altas temperaturas: no estará imantado porque el momento magnético de los átomos se halla orientado al azar en todas las direcciones. Al no darse una dirección preferente, el sistema presentará simetría rotacional. Cuando el hierro se enfríe, se producirá un cambio de fase: los momentos atómicos se alinearán y el hierro se imantará en una dirección determinada. La simetría rotacional aparecerá rota. Nótese que la simetría rotacional de las leyes que rigen las fuerzas a escala microscópica permanece intacta; la aparición de una simetría rota es característica de un sistema (el pedazo de hierro) formado por un gran número de partículas.

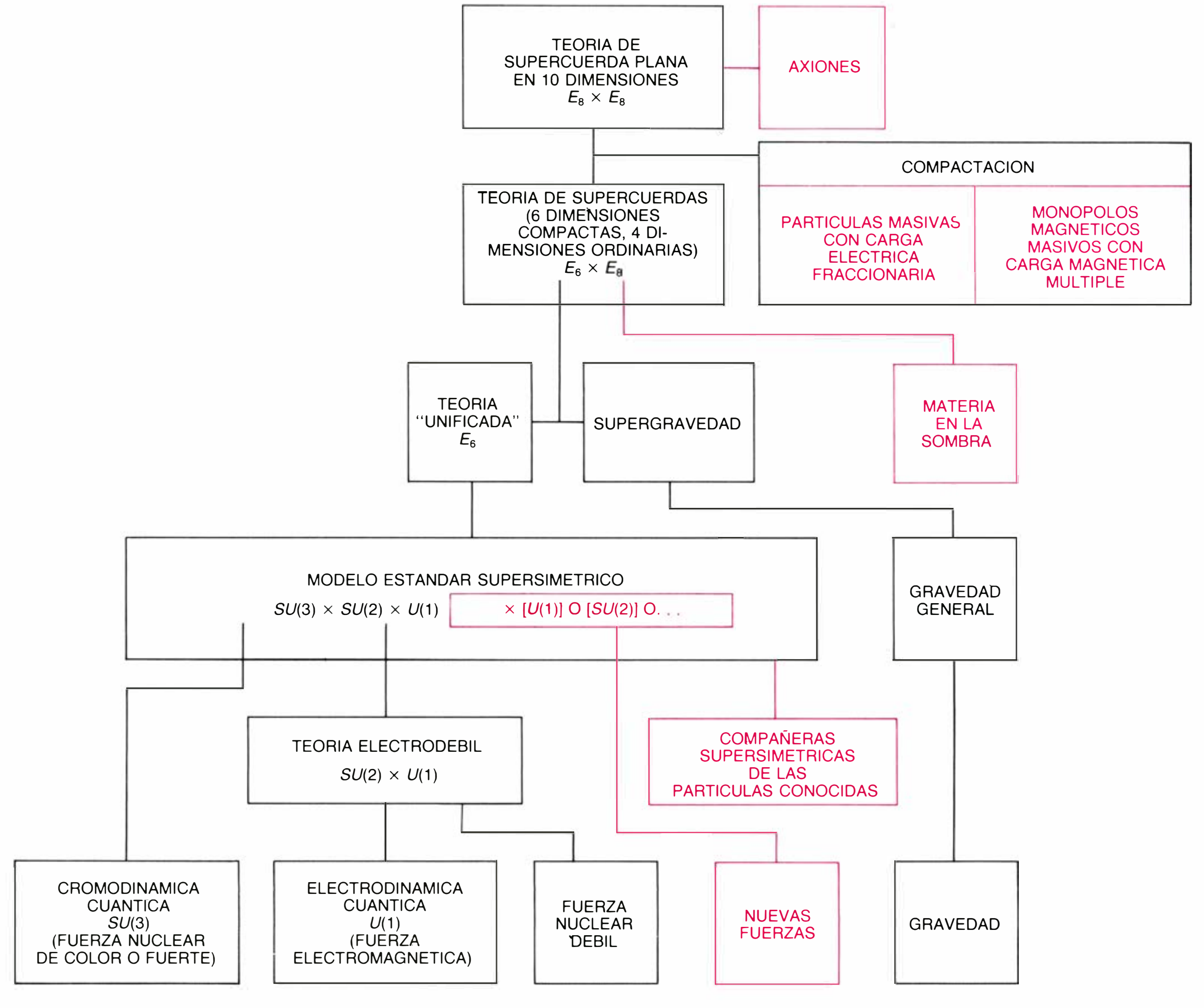
De manera análoga, muchas teorías de partículas elementales, incluidas las de supercuerdas, exigen grandes

grupos de simetría de aforo a fin de explicar, unificados, fenómenos diversos. En general, esa gran simetría aparece sólo a temperaturas altísimas; la simetría debe aparecer rota a las temperaturas terrestres ordinarias si se quiere una teoría coherente con las observaciones. Por ejemplo, la teoría electrodébil describe una versión unificada de las fuerzas electromagnéticas y débiles conocida como fuerza electrodébil, cuya simetría de aforo se basa en un grupo denominado $SU(2) \times U(1)$; este grupo constituye una extensión del grupo $U(1)$ asociado con el electromagnetismo. Sin embargo, a temperaturas ordinarias, se observan dos fuerzas: la electromagnética y la débil, que son completamente distintas. La simetría asociada con la unificación de las dos fuerzas se hace patente sólo a temperaturas muy por encima de los 10^{15} grados Celsius.

El éxito de las teorías cuánticas de campos de partículas puntuales dio un nuevo respiro a la teoría cuántica de campos; y muchos físicos pusieron su atención en esquemas más ambiciosos de unificación. Tales esquemas, casi invariablemente, no se fundaban en teorías de cuerdas, sino en simetrías más elaboradas, llamadas de gran unificación, construidas sobre teorías cuánticas de campos con partículas puntuales. Los esquemas de gran unificación, que ignoran la gravedad, estaban asociados a grupos de simetría llamados $SU(5)$, $SO(10)$ o E_6. Estas grandes simetrías pueden romperse en simetrías menores asociadas al grupo $SU(3)$, de la QCD, y al grupo $SU(2) \times U(1)$, de la teoría electrodébil.

Las temperaturas a las cuales las simetrías de gran unificación –y, por descontado, los efectos de la gravedad cuántica– podrían adquirir interés son extraordinarias; entre 10^{30} y 10^{32} grados C. En el planteamiento actual del origen del universo esas temperaturas se conocieron sólo entre los 10^{-43} y los 10^{-38} segundos subsiguientes a la gran explosión. A pesar de la brevedad de ese período, sus implicaciones en la posterior evolución del universo han sido profundas. Resulta así que la física de lo inmensamente minúsculo resulta decisiva para entender los fenómenos a escala cósmica.

Muchas de las nuevas teorías de gran unificación incorporan también la supersimetría, que transforma bosones y fermiones entre sí y, por ende, unifica las partículas de espín entero y semien-

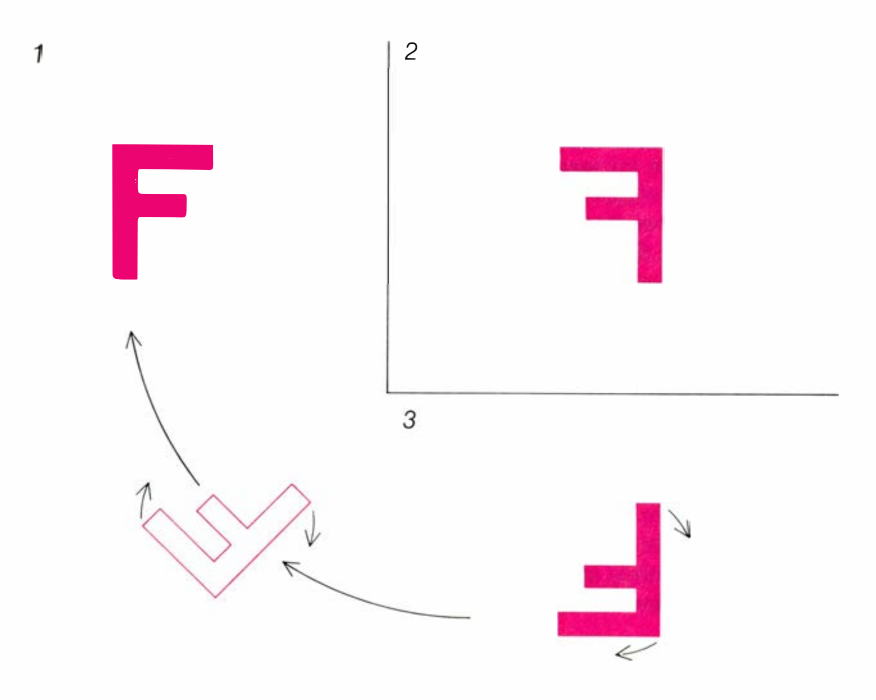


4. FUNDASE LA TEORIA DE SUPERCUERDAS en el ingente grupo de simetría $E_8 \times E_8$; puede establecer contacto con los fenómenos físicos experimentales mediante las conexiones que se indican. Cuando se consideran los efectos de la curvatura en las seis dimensiones curvadas, la teoría recuerda una teoría de gran unificación supersimétrica ligada a la supergravedad, cuya simetría está asociada al grupo $E_6 \times E_8$. Esta simetría puede romperse para dar el modelo estándar de las partículas y sus fuerzas, explicando las tres fuerzas no gravitatorias. En color, las nuevas partículas y fuerzas que podrían requerirse.

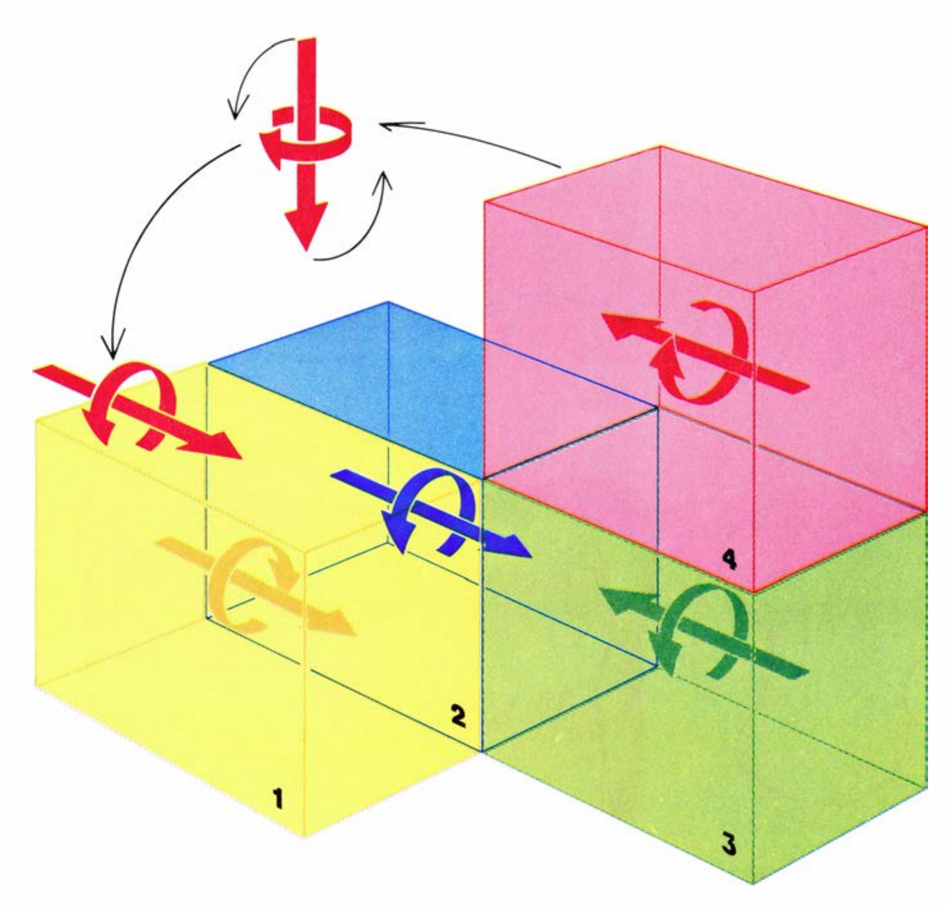
tero. En una teoría supersimétrica hay igual número de bosones que de fermiones, para una masa dada. Hemos asistido recientemente a distintos esfuerzos por combinar la teoría de Einstein de la gravedad con la supersimetría. Las teorías resultantes, llamadas de supergravedad, pertenecen a una nueva clase de teorías de aforo en la que el gravitino constituye la partícula de aforo responsable de la supersimetría; su espín es 3/2. Durante un tiempo, la teoría de supergravedad más corriente se formuló en un espacio-tiempo de 11 dimensiones: el espacio-tiempo ordinario de cuatro dimensiones y siete dimensiones espaciales adicionales.

Desde el punto de vista teórico actual, resulta curioso que uno de los primeros descubrimientos importantes en teoría de cuerdas se realizara en el seno de la investigación de las teorías de supergravedad en muchas dimensiones. En 1976, Ferdinando Gliozzi, de la Universidad de Turín, Scherk y David A. Olive, del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología, de Londres, sugirieron que la teoría de la cuerda girante podía supersimetrizarse. Pero nadie se entretuvo en considerar las consecuencias de semejante hipótesis, y el trabajo en teoría de cuerdas permaneció postergado. Letargo que duró hasta 1980, cuando Schwarz y el autor de este artículo (amén de la contribución de Lars Brink, del Instituto Chalmers de Tecnología de Göteborg) empezaron a construir teorías de cuerdas con supersimetría en el espacio-tiempo y a investigar sus propiedades.

Para entender por qué ha costado tanto resolver los problemas que surgen al reconciliar la gravedad con la teoría cuántica, es obligado conocer las implicaciones del principio de incertidumbre de Heisenberg a escalas de distancia inferiores a los 10^{-15} metros. Según dicho principio, cuanto con mayor precisión se haga una medida espacial, con menor exactitud se conocerá el momento o la energía del sistema que se estudia. Las incertidumbres de la energía aparecen a través de fluctuaciones a pequeñas distancias. Por ser equivalentes energía y masa, las fluctuaciones de energía pueden manifestarse en la creación de partículas "virtuales". Las partículas y antipartículas virtuales se materializan a partir del vacío en un brevísimo intervalo antes de aniquilarse entre sí. El mar de partículas virtuales da lugar a efectos de multipartícula, similares a los que se manifiestan en determinadas sustancias,



5. QUIRALIDAD, u orientación de las partículas. La pluralidad no puede definirse en un número par de dimensiones espaciales (o en un espacio-tiempo de dimensiones impares). En dos dimensiones, las reflexiones sucesivas de la letra asimétrica *F* respecto a ambos ejes de coordenadas se anulan mediante una rotación.

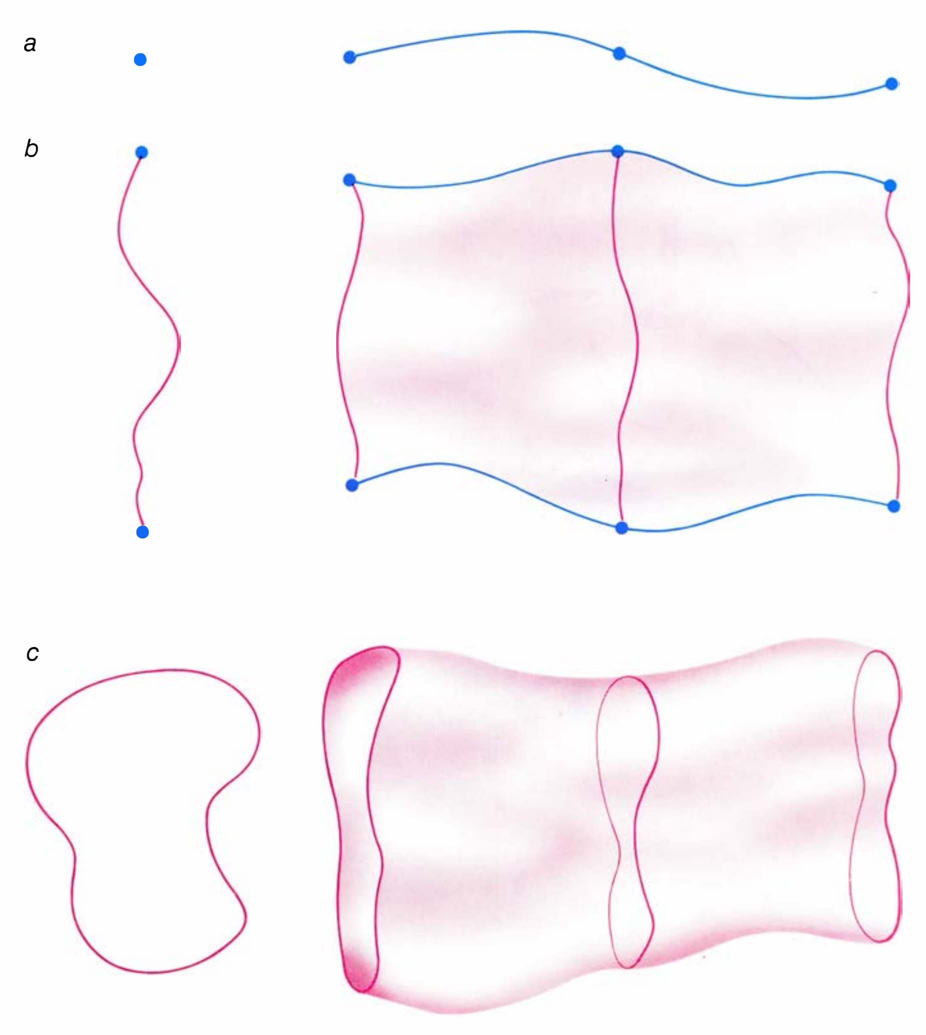


6. REFLEXION ESPECULAR respecto de todos los ejes coordenados en un espacio con un número impar de dimensiones (o en un espacio-tiempo de dimensión par). Dicha reflexión especular posibilita el descubrimiento de partículas quirales en el espacio. Por ejemplo, un neutrino (*1*) viaja a la velocidad de la luz y rota levógiramente alrededor de su dirección de movimiento. Su imagen especular tras la reflexión con respecto a los tres ejes (*4*) gira dextrógiramente; en otras palabras, no es equivalente a ninguna versión del neutrino original obtenida mediante rotaciones. En la naturaleza sólo se encuentra el neutrino levógiro, lo que demuestra que las leyes de la física son asimétricas con respecto a la quiralidad. (Esquema de Hank Iken.)

verbigracia, un ferroimán formado por muchos átomos.

Cuando la resolución espacial no llega a los 10^{-35} metros, las fluctuaciones de energía adquieren tal magnitud que, de acuerdo con la relatividad general, se forman agujeros negros virtuales. La energía de las fluctuaciones, unos 10^{19} GeV (un GeV equivale a mil millones de electronvolt), se conoce como energía de Planck; se denomina distancia de Planck la escala de distancias. El espacio-tiempo debe, por tanto, considerarse muy curvado a escalas pequeñas; en cierto sentido, es espumoso. Esta conclusión tiene consecuencias desastrosas para las técnicas de cálculo habituales en la teoría cuántica de campos, pues invalida la noción de espacio-tiempo como colección suave de puntos. En todos esos cálculos, se supone que la curvatura del espacio-tiempo es pequeña; si la hipótesis carece de validez, los cálculos dan resultados infinitos sin sentido. Este argumento sugiere que, a distancias cortas, o, equivalentemente, a energías altas, deben revisarse la relatividad general o la mecánica cuántica (si no ambas).

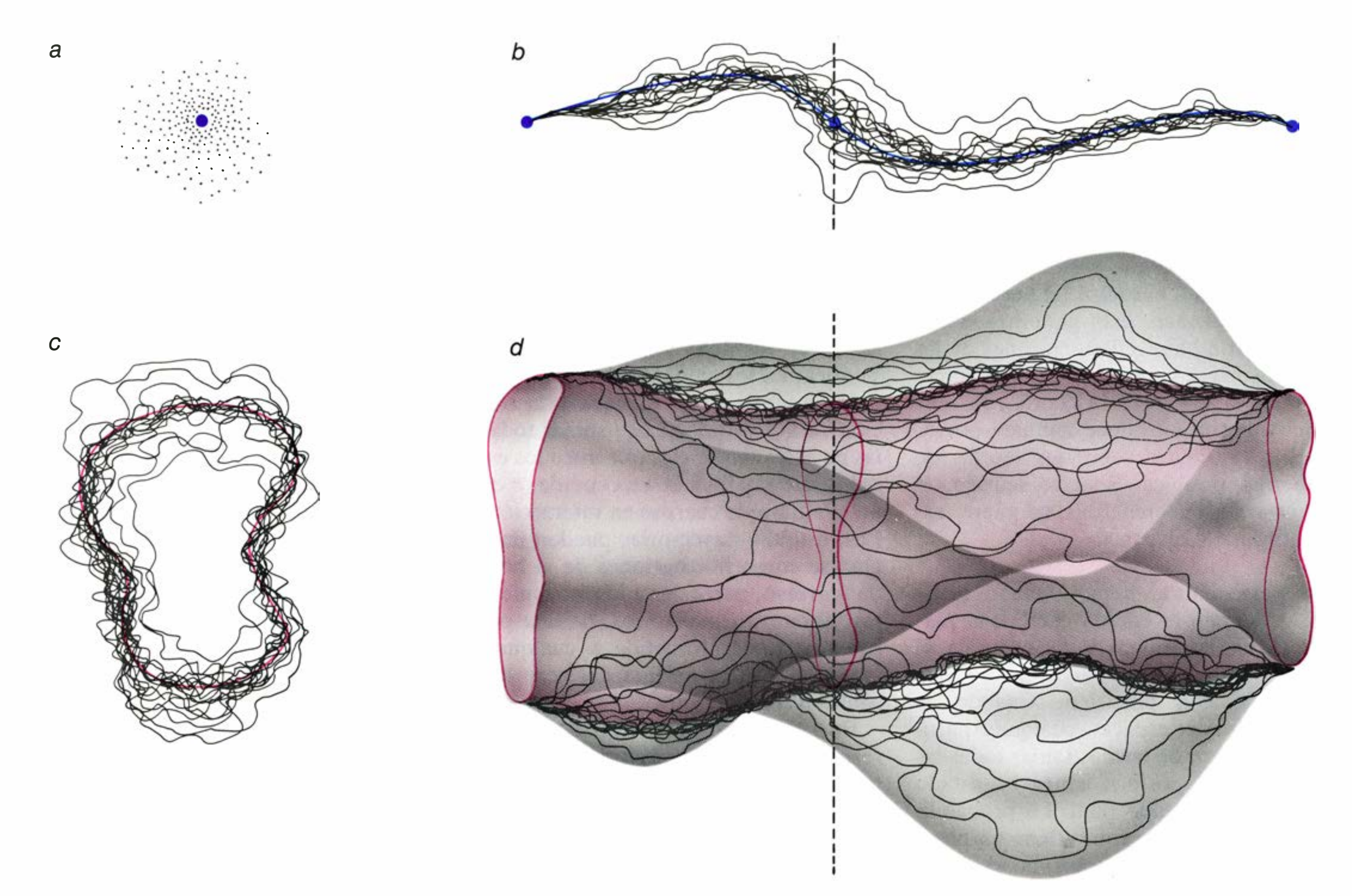
El correspondiente argumento no puede aplicarse a las cuerdas, ya que la teoría de supercuerdas modifica radicalmente las hipótesis de la relatividad general a distancias cortas. De acuerdo con lo antes señalado, las teorías de supercuerdas pueden exigir una revisión de la relatividad general en su nivel fundamental: la idea de un espacio-tiempo curvado, básica en la teoría de Einstein, quizás haya de extenderse al espacio, infinitamente más rico, de las configuraciones de la cuerda. Sin embargo, la explicación actual de la teoría empieza con un modelo más primitivo, en el que se supone que las cuerdas son partículas independientes que se mueven en algún espacio-tiempo de fondo fijado. Incluso con esta restricción, el tratamiento mecánico-cuántico de una cuerda conduce a limitaciones importantes sobre cualquier teoría de supercuerdas de la gravedad en muchas dimensiones.



7. EL PRINCIPIO DE MINIMA ACCION determina la trayectoria clásica (es decir, no mecánico-cuántica) de una partícula: si el tiempo se trata como una cuarta dimensión espacial, la trayectoria es la línea de mínima longitud del espacio-tiempo que une el estado inicial y el final (*arriba*). De acuerdo con el principio de mínima acción, una cuerda barre una hoja de universo de área mínima en el espacio-tiempo. A la izquierda se muestran cortes transversales. Las cuerdas abiertas portan cargas en sus extremos (*azul*) que definen los límites de la hoja (*centro*). Las cuerdas cerradas son bucles, carentes de extremos (*abajo*). Una cuerda que satisfaga dicho principio vibra en cualquier combinación de frecuencias armónicas. Como las deformaciones de la hoja de universo según las dos direcciones tangenciales a su superficie en cualquier punto no son configuraciones distintas de dicha hoja, sólo tienen realidad física las vibraciones perpendiculares a su superficie.

Hay dos clases de cuerdas: abiertas y cerradas. Las cuerdas abiertas tienen extremos a los cuales se asocian cargas conservadas (la carga eléctrica, por ejemplo), relacionadas con las fuerzas de Yang-Mills. Entre las partículas asociadas a los estados vibracionales de una cuerda abierta, se cuentan las partículas de aforo de masa nula y de espín 1, pero no está el gravitón. Al chocar, las cuerdas abiertas pueden entrar en interacción, tocándose y uniéndose por sus extremos, para formar una tercera cuerda; ésta puede, entonces, desdoblarse y constituir dos cuerdas finales. De manera similar, los dos extremos de una cuerda abierta pueden unirse para formar una cuerda cerrada. Los estados vibracionales de una cuerda cerrada incluyen el gravitón, de masa nula y espín 2. Así, en cualquier teoría con cuerdas abiertas habrá tambíen cuerdas cerradas, y en cualquier teoría de cuerdas con cuerdas cerradas resultará contradictorio despreciar la fuerza de la gravitación. En consecuencia, si las fuerzas de Yang-Mills del tipo del electromagnetismo se incluyen en una teoría de cuerdas, quedarán íntimamente unificadas con la gravedad.

Una clase de teoría en la que las fuerzas de Yang-Mills pueden asociarse con cuerdas cerradas fue formulada por David J. Gross, Jeffrey A. Harvey, Emil J. Martinec y Ryan Rohm, de la Universidad de Princeton. La teoría heterótica, como se la conoce, es la clase más prometedora de teorías de supercuerdas desarrollada hasta ahora. Su construcción resulta bastante extraña. Se introducen las cargas de las fuerzas de Yang-Mills difuminándolas a lo largo de toda la cuerda heterótica. Las ondas viajan en cualquier cuerda cerrada en dos direcciones, pero en la cuerda cerrada heterótica las ondas que viajan en el sentido de las agujas del reloj son ondas de una teoría de supercuerdas en 10 dimensiones; las ondas que avanzan en sentido contrario pertenecen a la teoría de cuerdas original,



8. "SUMA DE HISTORIAS": se trata de un recurso para explicar, en mecánica-cuántica, la interpretación probabilística que seguirá la trayectoria de una partícula. Se imagina la partícula puntual moviéndose simultáneamente a lo largo de todas las posibles líneas de universo del espacio-tiempo; a cada trayectoria se le asigna un peso, o probabilidad estadística, de tal manera que las trayectorias más cortas del espacio-tiempo sean, con mucho, las más probables. El resultado es una maraña de líneas de universo que presentan su densidad máxima a lo largo de la trayectoria clásica (*arriba, a la derecha*). La sección transversal de las líneas de universo, indicada por el segmento vertical a trazos, se muestra en la parte superior izquierda. La densidad de las líneas de universo en una región arbitraria de la sección transversal representa la probabilidad de encontrar la partícula en esa región y en ese instante. De manera similar, la mecánica cuántica de una cuerda se obtiene considerando todas las posibles hojas de universo con los mismos estados inicial y final, pesadas de tal manera que las de área menor, resulten ser, con mucho, las más probables (*abajo, a la derecha*). La densidad de bucles cerrados en una región dada de la sección transversal temporal de la hoja de universo (*abajo, a la izquierda*) representa la probabilidad que hay de encontrar la cuerda entera en dicha región y en ese instante.

en 26 dimensiones. Las 16 dimensiones suplementarias se consideran dimensiones internas y responsables de las simetrías de las fuerzas de Yang-Mills.

Cuando una cuerda se mueve, barre una superficie bidimensional del espacio-tiempo, denominada hoja de universo, exactamente igual que una partícula puntual recorre una línea de universo [*véase la figura 7*]. En relatividad general clásica, no mecánico-cuántica, las partículas se mueven a lo largo de la línea de universo que minimiza la llamada "acción de la partícula": su energía a medida que se mueve en el tiempo. La acción es proporcional a la longitud de la línea de universo; así, una trayectoria de mínima acción es una geodésica, o distancia más corta entre dos puntos del espacio-tiempo.

El movimiento de una cuerda recibe un tratamiento análogo. En una aproximación no mecánico-cuántica, la cuerda se mueve también de suerte que minimice su acción. La acción es proporcional al área barrida por la cuerda, con lo que la hoja de universo será una superficie de área mínima. Si consideramos el tiempo una dimensión espacial, la hoja de universo barrida por una cuerda cerrada puede imaginarse como una especie de película jabonosa que une la posición inicial de la cuerda con el final de su trayectoria en el espacio-tiempo.

Hay una notable simetría implicada en la condición de que el movimiento de la cuerda esté determinado por la minimización del área de su hoja de universo. El área es una cantidad geométrica independiente de cómo se designen los puntos de la hoja bidimensional. Ningún cambio en la designación puede cambiar la geometría subyacente de la hoja; se dice que la física es simétrica bajo redesignaciones arbitrarias de las coordenadas de la hoja de universo.

En virtud de esta simetría, carecen de significado físico las distorsiones de la hoja de universo según las dos direcciones tangentes a la superficie de la hoja en cualquier punto. Las únicas vibraciones de la cuerda que sí lo tienen son las ondulaciones de la hoja de universo perpendiculares a su superficie. Por tanto, si la cuerda se mueve en d dimensiones, habrá dos direcciones de vibración sin realidad física. Todas las vibraciones reales son vibraciones transversales en d-2 dimensiones.

Vale la pena reseñar que tal restricción en los modos de vibración de los fotones, las ondas del campo electromagnético, es una característica de la teoría de Maxwell. Las vibraciones del fotón en la dirección del tiempo no tienen sentido físico, y las vibraciones longitudinales que se producen según la dirección en que se mueve la onda no son posibles en una onda que viaja a la velocidad de la luz. La simetría de aforo del electromagnetismo asegura la

ausencia de tales vibraciones no físicas.

Desde este punto de vista, cabría esperar problemas insuperables en una teoría de cuerdas, pues una cuerda está formada por un número infinito de puntos. Cada punto de la cuerda vibra, de manera que el potencial de vibraciones no físicas de una cuerda es infinitamente mayor que para una partícula puntual como el fotón. La ausencia de tales vibraciones está garantizada por la simetría bajo redesignaciones de las coordenadas. Cuando estudiamos la mecánica cuántica de la cuerda, la misma simetría introduce también potentes restricciones sobre las teorías de cuerdas posibles. En este sentido, la teoría de supercuerdas adquiere extraordinaria elegancia.

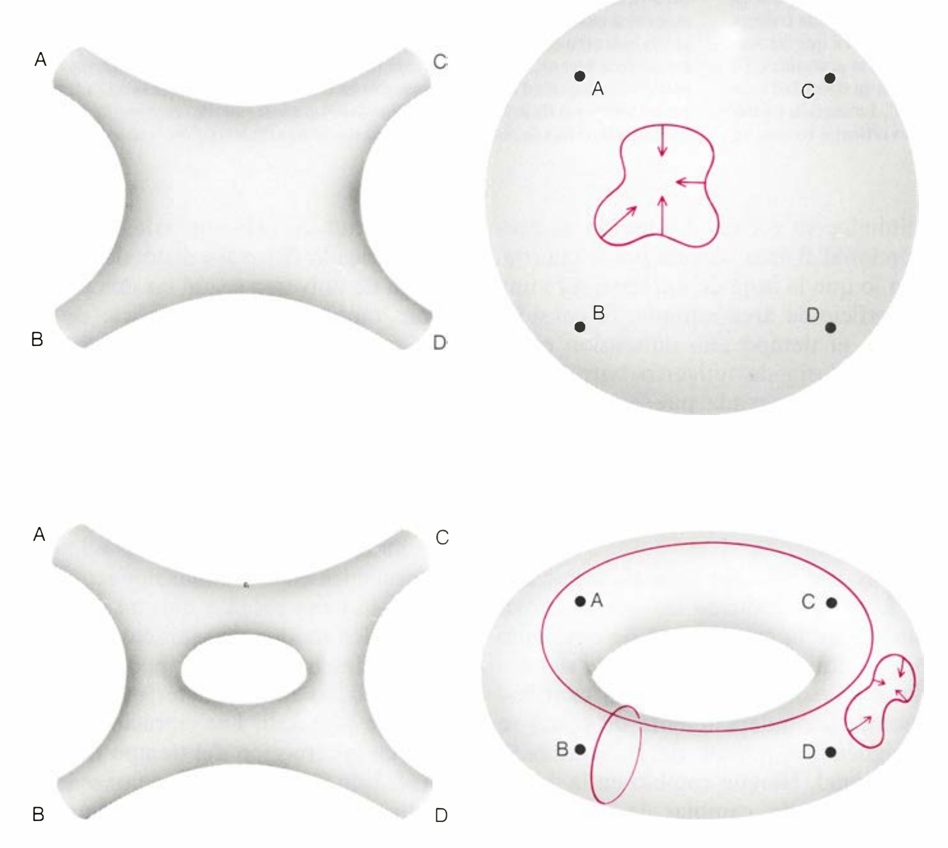
Hasta ahora, hemos venido suponiendo la cuerda como una partícula clásica. En mecánica cuántica, el movimiento de las partículas no está definido con precisión. Cuando se mueve por el espacio, cualquier partícula intenta, de hecho, tomar todas las trayectorias posibles entre su estado inicial y su estado final. La probabilidad de cada trayectoria tiene un peso, y así se asigna una probabilidad mayor a las trayectorias de menor acción; la trayectoria clásica, de mínima acción, es la más probable. Esta formulación del comportamiento cuántico de una partícula –denominado método de suma sobre historias– fue propuesta por Richard P. Feynman, del Caltech. Su aplicación a la teoría de cuerdas ha sido desarrollada por Stanley Mandelstam, de la Universidad de California en Berkeley, y por Alexander M. Polyakov, del Instituto Landau de Física Teórica, en los aledaños de Moscú.

En la teoría de supercuerdas, la adición de las historias exige sumar todas las posibles superficies que unen los estados inicial y final de una cuerda, o de un conjunto de cuerdas en interacción. Las distintas trayectorias pueden imaginarse como fluctuaciones de la hoja de universo, parecidas a los movimientos vibratorios, aleatorios, de una película jabonosa sometida a cualquier temperatura por encima del cero absoluto [*véase la figura 8*].

En 1972, se formuló una importante restricción mecánico-cuántica sobre las teorías de cuerdas; Richard Brower, de la Universidad de Boston, Peter Goddard, de la Universidad de Cambridge, y Charles B. Thorn, de la Universidad de Florida en Gainesville, postularon lo siguiente: la exigencia de simetría bajo redesignaciones de las coordenadas de la hoja de universo de una cuerda libre que sufre fluctuaciones cuánticas basta para determinar el número de dimensiones del espacio-tiempo de fondo donde se mueve la cuerda. Recordemos que, en la teoría de resonancia dual original, el número de dimensiones del espacio-tiempo era 26; en teorías de supercuerdas, se requieren 10 dimensiones. Este resultado había sido anticipado un año antes, en trabajos de Claud W. V. Lovelace, de la Universidad de Rutgers. La restricción constituye un ejemplo impresionante acerca de cómo la formulación de la teoría en términos de hojas de universo bidimensionales conduce a una estructura rica y determinada del espacio en el que se mueve la cuerda.

Las frecuencias vibracionales de una supercuerda vienen establecidas por su tensión, la cual se mide en unidades de energía por unidad de longitud, o de masa al cuadrado, en unidades fundamentales. Puesto que la teoría tiene que describir la gravedad, la tensión de la cuerda debe estar estrechamente relacionada con la energía de Planck, que es el único parámetro dimensional de la teoría gravitatoria. La tensión de la cuerda debe ser, por tanto, del orden de 10^{19} GeV al cuadrado; en unidades más corrientes, esto equivale a una fuerza de 10^{39} toneladas. Las frecuencias de los modos vibracionales normales de la cuerda estarán separadas, pues, por intervalos enormes: las partículas correspondientes a los estados vibracionales más bajos son de masa nula, pero las partículas correspondientes al siguiente estado vibracional presentan una masa aproximadamente igual a la de un grano de polvo, lo que resulta ingente para una partícula elemental. Para las vibraciones de frecuencias más altas, la masa correspondiente crece sin límite.

El significado de los estados de masa nula de la teoría de supercuerdas es que no sólo incluyen el gravitón, las partículas de aforo de espín 1 de las otras fuerzas y partículas de espín 0 y espín 1/2, sino también el gravitino, la partícula de aforo de espín 3/2 asociada a la supergravedad. Así, para energías por debajo de la de Planck, las partículas de masa nula de las teorías de supercuerdas son las que hay en las teorías de supergravedad.

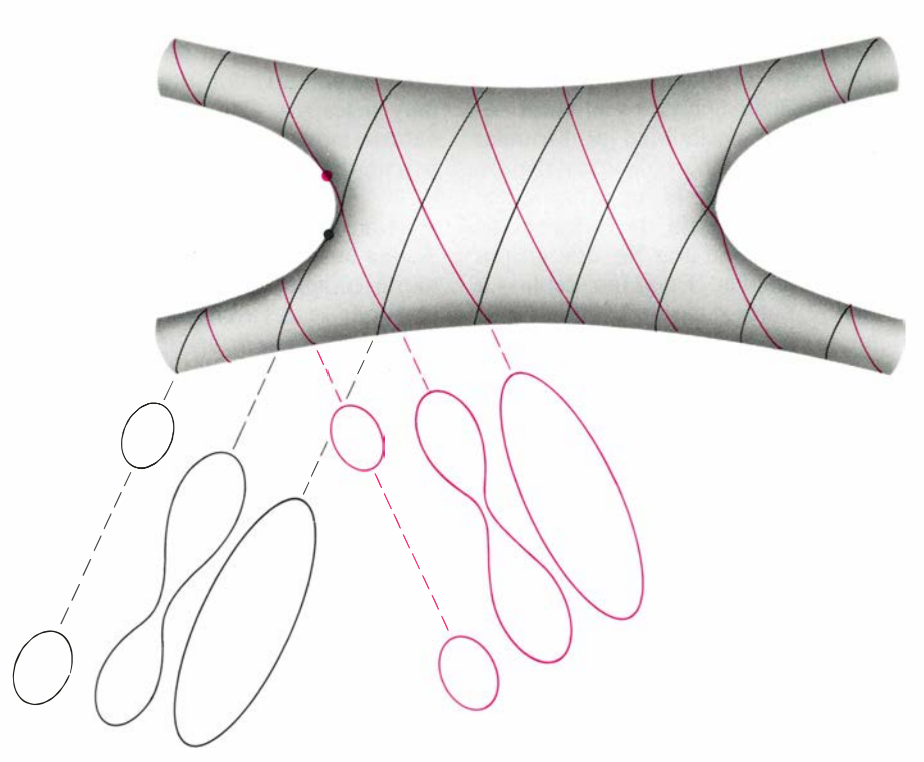


9. INTERACCIONES ENTRE CUERDAS, representadas mediante hojas de universo topológicamente equivalentes a una esfera o a una rosquilla con un número arbitrario de agujeros. Las superficies son continuas, salvo en los puntos que representan las cuerdas entrantes o salientes (*A, B, C, D*). La esfera se caracteriza por el hecho de que cualquier curva cerrada de su superficie puede reducirse de manera continua a un punto. Las dos clases de curvas cerradas del toro no pueden reducirse de manera continua a un punto.

Una teoría de cuerdas cuántica difiere de la teoría cuántica de una partícula puntual en otro aspecto importante. Consideremos de nuevo la

suma de historias de una única cuerda cerrada: incluye todas las posibles superficies conexas que pueden estirarse, torcerse o deformarse de alguna otra manera suave, para dar un cilindro, sin rasgarlo. Se dice que todas estas superficies equivalen, topológicamente, al cilindro; abarcan superficies con largos tentáculos [*véase la figura 12*]. Bajo ciertas asignaciones de la coordenada temporal de la hoja de universo, los tentáculos pueden imaginarse como movimientos en los que dos cuerdas cerradas se unen para formar otra nueva, o en los que una nueva cuerda cerrada se desprende de la original y desaparece en el vacío.

Así, la cuerda interactúa automáticamente con el espacio de fondo donde se mueve, aun cuando estas interacciones no se incluyan explícitamente en la suma de historias. Por el contrario, la suma de historias de una única partícula puntual no comprende ninguna información acerca de las interacciones con el espacio de fondo. En virtud de la naturaleza de la interacción de una cuerda con su fondo, el propio movimiento de una sola cuerda únicamente puede describirse de modo coherente si la curvatura del espacio de fondo está severamente restringida. Este resultado se hallaba implícito en el trabajo de Daniel Friedan, de la Universidad de Chicago, realizado en 1979.



10. EN QUE INSTANTE PRECISO dos cuerdas se unen no puede especificarse de manera objetiva, por la sencilla razón de que la definición de la coordenada temporal de un punto en una hoja de universo depende del observador. Las líneas de coordenadas coloreadas indican contornos de tiempo igual, tal como se definen por un observador. Para éste, las dos cuerdas entrantes parecen unirse en el punto coloreado. Para otro, los contornos de tiempos iguales son las líneas negras; las cuerdas parecen unirse en el punto negro.

Para apreciar la importancia del hallazgo, hay que saber que las 10 dimensiones necesarias en una teoría de supercuerdas sin contradicción interna no se suponen inicialmente curvadas. La teoría se formuló en un comienzo bajo la hipótesis simplificadora de que las 10 dimensiones eran equivalentes, es decir, que todas ellas eran "planas". Ahora bien, para que una teoría de supercuerdas dé cuenta de las observaciones físicas, resulta obligado que seis dimensiones espaciales se hallen muy curvadas. Si la suma de historias de la hoja de universo ha de ser coherente, las seis dimensiones estarán curvadas de algún modo especial. (Los modos posibles son pocos.) Y se dice que forman una clase de espacio denominado espacio de Calabi-Yau, en honor de Eugenio Calabi, de la Universidad de Pennsylvania, y Shing-Tung Yau, de la Universidad de California en San Diego; podrían formar también una generalización de dicho espacio denominada variedad de órbitas ("orbifold"). Estos espacios conducen a un esquema prometedor, capaz de explicar la física de las cuatro dimensiones observables.

Gran parte del interés en las teorías de supercuerdas se debe a la rica estructura que se obtiene al exigir la coherencia interna de la teoría. Si la teoría tiene que dar una descripción cuántica realista de las fuerzas de Yang-Mills, contará con una restricción empírica, además de la exigencia de que sólo haya cuatro dimensiones observables: la teoría debe conducir a la quiralidad observada en la fuerza débil.

La fuerza débil es responsable de las desintegraciones radiactivas del tipo de la desintegración beta, que es una reacción importante en el Sol. La fuerza es quiral (de la palabra griega χειρ, que significa mano), en el sentido de que da lugar a efectos cuyas imágenes especulares no existen en la naturaleza. Por desgracia, la versión mecánico-cuántica de cualquier teoría de aforo quiral probablemente viole leyes de conservación tales como la conservación de la carga eléctrica. Dicha violación, o anomalía quiral, indica una rotura de la simetría de aforo que pone de manifiesto la incoherencia de la teoría. Hallar una teoría que sea quiral y que, a la vez, evite las anomalías quirales es un asunto delicado en cuatro dimensiones; hasta hace poco se creía incluso que era imposible en 10 dimensiones.

Sólo cuando el espacio tiene un número impar de dimensiones (o cuando el espacio-tiempo posee un número par), cabe definir el concepto de quiralidad. En cualquier número de dimensiones, la quiralidad depende del resultado de las sucesivas reflexiones especulares según todos los ejes espaciales. Cuando el espacio tiene un número impar de dimensiones, las reflexiones especulares según cada eje espacial dan un número impar de reflexiones, de manera que una forma orientada levógiramente se transforma en otra orientada dextrógiramente. Con un espacio de un número par de dimensiones, la reflexión según todos los ejes espaciales deja inalterada cualquier forma: la imagen reflejada puede convertirse, por rotación, en la forma original. En este contexto, la popular teoría de la supergravedad en 11 dimensiones no puede conducir a una teoría quiral debido a que está formulada en 10 dimensiones espaciales (un número par). Con sus nueve dimensiones espaciales, la teoría de supercuerdas puede ser quiral.

Incluso cuando una teoría de muchas dimensiones es quiral, el proceso de curvar las dimensiones suplementarias elimina generalmente la quiralidad. Se cree que la quiralidad observada sólo puede explicarse en la hipótesis de que la teoría quiral en más dimensiones se formule inicialmente incluyendo el grupo de simetría de aforo de una fuerza de Yang-Mills, además de la fuerza gravitatoria. El grupo de simetría debe estar presente en la teoría plana, de 10 dimensiones, antes de que se considere la posibilidad de que las

dimensiones suplementarias se curven.

En agosto de 1984, para sorpresa de muchos físicos, Schwarz y el autor demostraron la posibilidad de formular una teoría quiral libre de anomalías en 10 dimensiones, en el supuesto de que el grupo de simetría de la fuerza de Yang-Mills fuera uno de dos grupos predeterminados. El grupo debía ser el $SO(32)$, una generalización hasta 32 dimensiones internas de la simetría del espacio-tiempo, o el grupo $E_8 \times E_8$, el producto de dos grupos continuos excepcionales, descubiertos por el matemático francés Élie Cartan. Recientemente se ha observado que un tercer grupo, el $O(16) \times O(16)$, conduce también a la ausencia de anomalías; su simetría es una subsimetría de los otros dos grupos posibles. El hecho de que la coherencia cuántica de una teoría que contiene la gravedad nos lleve a una predicción casi única del grupo unificado de simetría constituyó un avance muy sugestivo. Con él nació la ola de entusiasmo actual por las teorías de supercuerdas.

La mecánica cuántica de una cuerda es tan sólo una aproximación a la teoría completa, aún no desarrollada, en la que se describirían las interacciones de un número arbitrario de cuerdas. Las interacciones surgen cuando éstas se unen o se rompen. La probabilidad de que un conjunto dado de cuerdas entrantes conduzca a un conjunto determinado de cuerdas salientes viene establecida por una serie infinita de los llamados diagramas de Feynman. Mediante éstos se describen todas las posibles uniones o separaciones de las hojas de universo, sumadas sobre las historias de cada caso.

11. INVARIANCIA en la designación de las coordenadas de espacio y tiempo en una hoja de universo con la topología del toro; se trata aquí de una condición más apremiante incluso que en el caso de la esfera. Un toro puede cortarse como una salchicha (*diagrama superior*) o como un yo-yo (*diagrama inferior*). Un lado del corte puede girarse con respecto al otro lado y "pegar" después los dos contornos. Los puntos de la superficie quedan designados según un conjunto de coordenadas (*curvas negras y de color*) que no pueden deformarse de manera continua para dar el conjunto de coordenadas original. La exigencia de que la teoría de supercuerdas no dependa de tal recreación impone severas restricciones a los grupos de simetría asociados a las fuerzas no gravitatorias de la teoría. Los grupos de simetría serán: $SO(32)$, $E_8 \times E_8$ u $O(16) \times O(16)$.

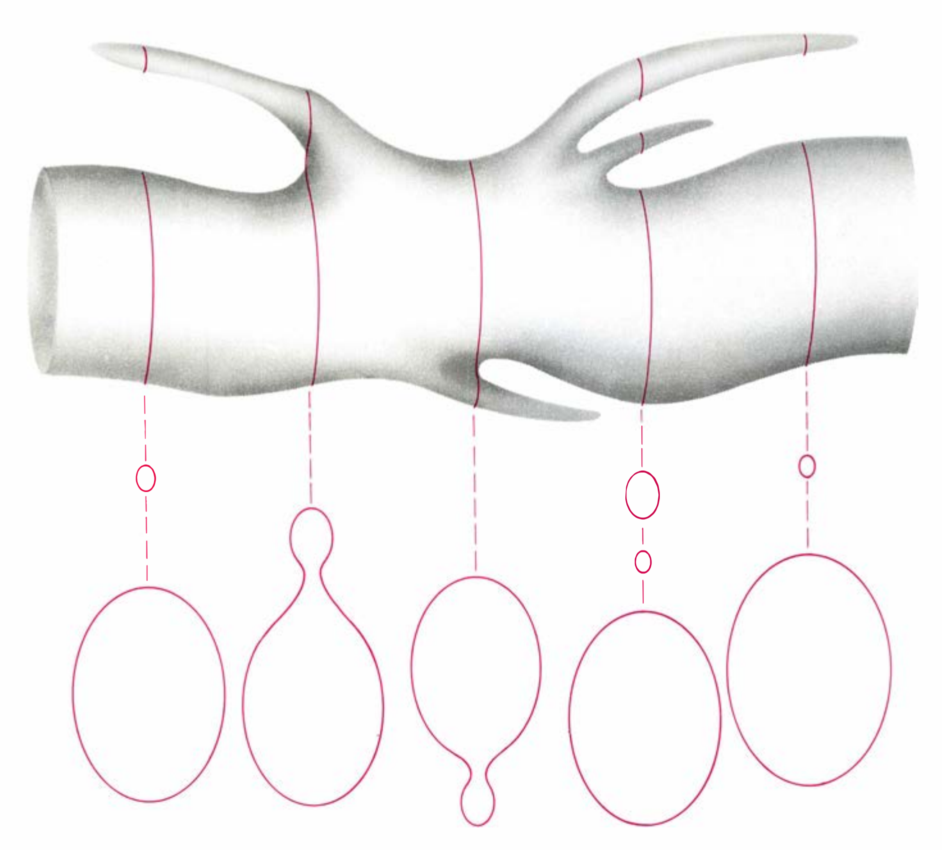
La sencillez de la serie de los posibles diagramas de Feynman para las cuerdas contrasta fuertemente con la complejidad de los posibles diagramas de Feynman de las partículas puntuales. Consideremos los diagramas posibles para dos cuerdas cerradas en interacción. En primer lugar, ambas pueden unirse y después separarse. El diagrama de Feynman del proceso es topológicamente equivalente a la superficie de una esfera [*véase la figura 9*]. En el siguiente término de la serie, la cuerda intermedia se desdobla en dos, que después tornan a unirse. El diagrama equivale, en su topología, a un toro, la superficie de una rosquilla ("donut"). La serie de diagramas prosigue añadiendo agujeros a las rosquillas: dos, tres agujeros, etcétera.

La exigencia de simetría bajo redesignación de las coordenadas del toro introduce nuevas y severas restricciones en la teoría de supercuerdas. Si el toro se corta de alguna de las dos maneras posibles, se tuerce y vuelve a engarzarse, su topología no cambia; sin embargo, el sistema de coordenadas torcido no puede transformarse de manera continua en el original sin cortar de nuevo la superficie [*véase la figura 11*]. La invariancia del toro bajo tales cambios de coordenadas conduce a una importante restricción en la teoría de la supercuerda heterótica. Una cuerda heterótica se puede mover en el espacio-tiempo plano de 10 dimensiones en la hipótesis exclusiva de que la simetría de las fuerzas no gravitatorias de la teoría esté descrita por el grupo $E_8 \times E_8$, el grupo espín $(32)/Z_2$, una variante del $SO(32)$, o el grupo $O(16) \times O(16)$.

La restricción impuesta a estos grupos es sorprendente. Recordemos que Schwarz y el autor habían llegado a los mismos grupos exigiendo la ausencia de anomalías quirales en una teoría coherente de aforo quiral en 10 dimensiones. La restricción que conduce a estos grupos en la teoría heterótica se relaciona con las notables propiedades matemáticas de ciertas redes de puntos en 16 dimensiones. Tales redes se construyen a partir de las 16 dimensiones internas antes mencionadas.

Hay otro rasgo de parecida curiosidad en el diagrama del toro; nos revela la profunda diferencia que existe entre las teorías de cuerdas y las teorías de partículas puntuales. De las muchas clases de diagramas de Feynman de un bucle para partículas puntuales que son análogos del diagrama del toro, hay algunos que dan resultados infinitos cuando se calcula la suma de historias. ¿De dónde surgen esos infinitos? Débense a que los diagramas para las par-

tículas puntuales incluyen la suma de historias cuando los dos puntos de interacción están arbitrariamente próximos en el espacio-tiempo. Hay que considerar las contribuciones, de todas y cada una de las trayectorias fluctuantes, al proceso completo; estas últimas se dan en un número indefinidamente grande, lo que aboca en los resultados infinitos. Por el contrario, en un diagrama de Feynman de cuerdas, ningún punto puede identificarse con un punto de separación o unión de dos cuerdas [*véase la figura 10*]. Así pues, por lo menos en los diagramas de un bucle de interacción de cuerdas, no se presenta el concepto de punto de interacción. La suma de historias conduce a resultados finitos precisamente en aquellas teorías de supercuerdas cuyas fuerzas de Yang-Mills están asociadas con los grupos de simetría $E_8 \times E_8$ o $SO(32)$.



12. ANALISIS MECANICO-CUANTICO de una única hoja de universo: nos lleva a fuertes restricciones sobre la clase de espacio curvado de fondo en el que se mueve la cuerda. La suma mecánico-cuántica de historias abarca configuraciones de la hoja de universo que describen cuerdas que se materializan a partir del vacío (*izquierda*) o que se separan y desaparecen en el vacío (*derecha*). Así, las interacciones de las cuerdas con el fondo quedan automáticamente incluidas en el tratamiento cuántico de una cuerda. Los únicos espacios de fondo que se sabe son coherentes con tales efectos son los llamados espacios de Calabi-Yau o afines.

Un inconveniente que comparten todas las teorías cuánticas de la gravedad, cuyas escalas naturales de energía son necesariamente enormes, lo constituye la dificultad de extraer predicciones comprobables u observables en energías más modestas. En ese sentido, aunque la teoría de supercuerdas se formule en 10 dimensiones del espacio-tiempo plano con ingentes simetrías unificadoras, sólo se puede despreciar la curvatura de las seis dimensiones suplementarias a una escala de distancias pequeñísima, o, lo que es lo mismo, a unas energías o temperaturas elevadísimas; y únicamente entonces se hace patente la entera simetría de la teoría. Cualquier pretensión de inferir consecuencias de la teoría en el dominio de las bajas energías habrá de limitarse al campo de la especulación. Se presentan gravísimas dificultades a la hora de aventurarse en predicciones concretas. A pesar de todo lo cual, nos es dado esbozar ya una imagen plausible de cómo la teoría de supercuerdas puede conectar con los fenómenos observados en los aceleradores.

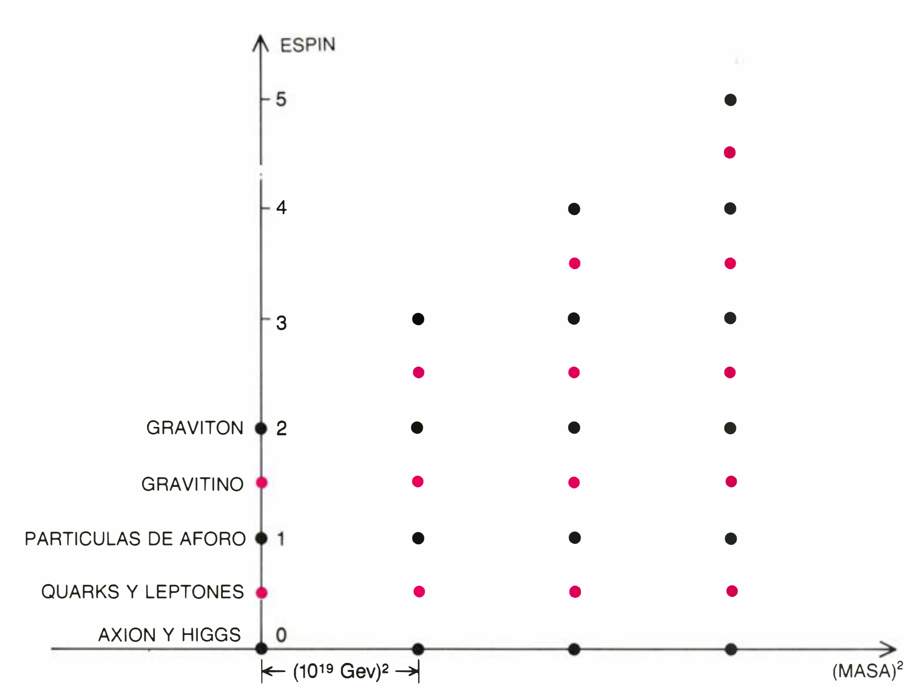
Muchos aspectos de ese cuadro se basan en argumentos topológicos cuya aplicación a la física comenzó a desarrollarla Edward Witten, de Princeton. Vio éste que el curvamiento de las dimensiones suplementarias y la rotura de la simetría iban de la mano: debía existir una estrecha correlación entre la curvatura de las dimensiones suplementarias y la manera cómo la notable simetría asociada con las fuerzas de Yang-Mills se rompía para dar una simetría menor. En el espacio-tiempo plano de 10 dimensiones, los valores medios de los campos asociados con las fuerzas de Yang-Mills de $E_8 \times E_8$ o de $SO(32)$ son cero. Witten demostró que si la curvatura del espacio no era nula en ciertas dimensiones, los valores medios de estos campos en el espacio curvado tampoco lo serían en las mismas dimensiones.

Un valor medio no nulo de un campo indica una transición a una fase de menor simetría, de la misma manera que la imantación no nula de un ferroimán señala la transición a la fase magnetizada, de menor simetría. Así, si seis dimensiones del espacio-tiempo plano original se curvan fuertemente, las fuerzas de Yang-Mills de la teoría del espacio curvado resultante están unificadas en una subsimetría de $E_8 \times E_8$ o de $SO(32)$. Este resultado es justamente lo que se desea.

Hasta ahora no se ha demostrado que las seis dimensiones espaciales deban curvarse en la teoría de supercuerdas. Sin embargo, tal como se dijo antes, la exigencia de que la teoría mantenga su gran simetría bajo las redesignaciones de las coordenadas de las hojas de universo obliga a que las dimensiones curvadas formen un espacio de Calabi-Yau, o quizás una variedad de órbitas. Suponiendo que seis dimensiones se curvan de ese modo, Philip Candelas, de la Universidad de Texas en Austin, Gary T. Horowitz, de la Universidad de California en Santa Bárbara, Andrew E. Strominger, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, y el propio Witten han creado un esquema sugestivo para explicar la relación de la teoría de supercuerdas con fenómenos medidos dentro del rango de energías de los experimentos actuales.

En el esquema de Candelas y sus colaboradores, el valor medio del campo eléctrico asociado al grupo $E_8 \times E_8$ se iguala al valor no nulo de la curvatura del espacio de seis dimensiones. Habida cuenta de las especiales características de los espacios de Calabi-Yau (o de las variedades de órbitas asociadas), la simetría se rompe, de una manera particular, en el grupo $E_6 \times E_8$, sin perder la supersimetría. Es reconfortante obtener así el grupo E_6, pues constituye uno de los grupos considerado en el estudio de la unificación de las fuerzas de Yang-Mills.

El grupo E_8 suplementario aumenta vigorosamente la simetría, pero no afecta de un modo directo a las partículas observadas. Las partículas que transmiten las fuerzas asociadas a esta simetría E_8 son neutras con respecto a



13. ESPECTRO DE ESTADOS DE UNA CUERDA, representado aquí para la teoría de la cuerda heterótica, en la que se han curvado las seis dimensiones suplementarias del espacio-tiempo. Cada punto negro simboliza un conjunto de bosones; cada punto de color, un conjunto de fermiones. Todos los estados de la cuerda que corresponden a partículas conocidas son estados sin masa; los estados con masa no nula forman una serie infinita cuyas masas al cuadrado son un número entero de veces el cuadrado de la masa de Planck, que es 10^{19} GeV. Para cada masa, el número de estados fermiónicos es igual al número de estados bosónicos. Si cada posible dirección del espín se cuenta como un estado distinto, habrá 8064 estados carentes de masa y 18.883.584 estados en el primer nivel de masa; a partir de ahí, el número aumenta exponencialmente.

las fuerzas de Yang-Mills observadas, pero deben ejercer atracción gravitatoria. Se ha pensado si la materia formada por tales partículas, conocida como materia en la sombra, no encerraría acaso la clave de parte de la masa oculta presente en el universo.

Una predicción inmediata de esta interpretación de la teoría de supercuerdas es la existencia del axión, partícula que evitaría la violación de una importante simetría de la QCD, la teoría de la interacción fuerte. Aunque todavía no se ha encontrado el axión, varios grupos de investigadores están preparando experimentos que podrían detectarlo.

Muchas otras consecuencias físicas se obtienen de propiedades puramente topológicas de las seis dimensiones curvadas. Una de las propiedades topológicas básicas de un espacio es su número de Euler; si el espacio curvado fuera bidimensional, el número de Euler sería dos menos el doble del género de la superficie, siendo el género el número de agujeros. En seis dimensiones, la descripción del número de Euler resulta más difícil.

Los fermiones observados se agrupan de manera natural en "generaciones" de quarks y leptones [*véase la figura 2*]. Los leptones son fermiones que no están sometidos a interacciones fuertes. Hasta ahora se han descubierto tres generaciones y es probable que como máximo exista otra. El número de generaciones predicho es la mitad del número de Euler del espacio compacto de seis dimensiones. Como sólo unos pocos espacios de Calabi-Yau y unas pocas variedades de órbitas tienen un número de Euler pequeño, sólo esos pocos son los candidatos para describir los fenómenos físicos observados.

Los espacios de seis dimensiones que tienen un número de Euler pequeño son espacios que también contienen "agujeros" [*véase la figura 14*]. La presencia de los agujeros permite que los campos asociados al grupo de simetría E_6 queden atrapados. La captura de los campos induce que la simetría se rompa más, sin necesidad de introducir las llamadas partículas masivas de Higgs, asociadas a tal rotura de simetría. La cromodinámica cuántica y la teoría electrodébil de la física estándar de partículas elementales, cuyas simetrías se describen por el grupo producto $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, pueden obtenerse fácilmente a partir de esta última rotura de simetría. Es probable que la misma rotura de simetría dé lugar a fuerzas adicionales, asociadas a los remanentes de E_6.

Hay muchas maneras de que una cuerda cerrada quede atrapada en el espacio curvado. La cuerda puede, por ejemplo, rodear un agujero; sus vibraciones se manifestarían entonces como partículas dotadas de masa y con carga eléctrica fraccionaria, o como mono-

polos magnéticos masivos y con cargas magnéticas múltiples.

Aunque la teoría de supercuerdas ha abierto ya muchas líneas de investigación, en el ámbito de la física y en las matemáticas, persisten cuestiones fundamentales cuya respuesta tendrá que esperar un mejor conocimiento de la estructura de la teoría. Vayan unas cuantas por delante: ¿por qué el espacio-tiempo observado es aproximadamente plano y de cuatro dimensiones? ¿Puede probarse que seis dimensiones están curvadas? Más aún, ¿por qué razón las cuatro dimensiones usuales son tan grandes? Inmediatamente después de la gran explosión, cuando el tamaño del universo observado era del orden de la distancia de Planck, 10^{35} metros, las 10 dimensiones debían estar curvadas. Durante la expansión subsiguiente del universo todas, salvo seis, empezaron a desplegarse y expandirse. Una explicación coherente del proceso podría llevarnos a la predicción de un residuo cósmico observable.

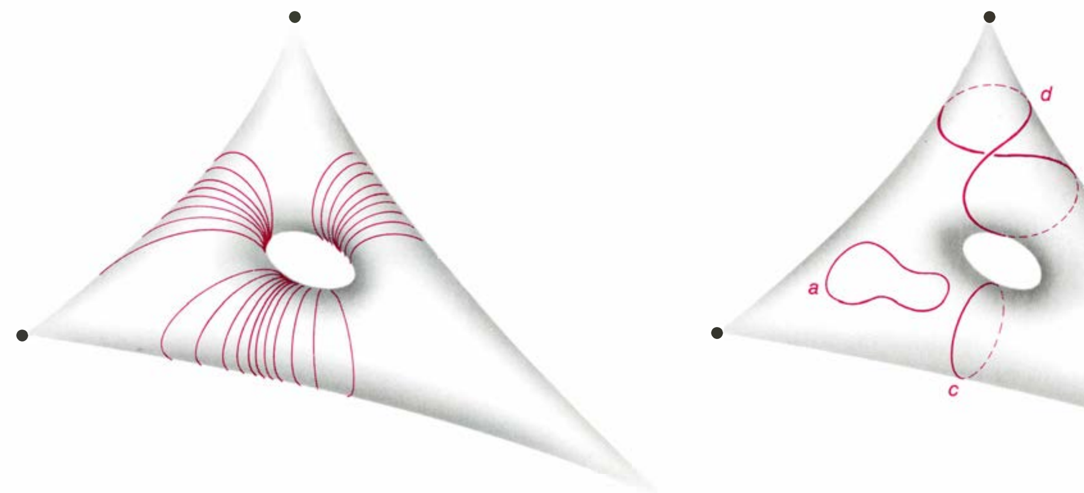
Esos temas guardan una estrecha relación con otra cuestión fundamental: ¿por qué la constante cosmológica se aproxima tanto a cero? La constante describe la parte de la curvatura del universo que se debe a la materia; se ha determinado que su valor es cero con un error de una parte en 10^{120}, convirtiéndola en la medida más exacta de toda la ciencia. Si la teoría de supercuerdas llegara a justificar este valor, la explicación sería una prueba convincente de la teoría.

Como he indicado antes, la escala natural de masas de la teoría de supercuerdas adquiere tales proporciones que las masas de las partículas más pesadas observables en los aceleradores actuales son, en comparación con la misma, infinitesimales. Mientras la supersimetría incluida en las teorías de supercuerdas permanece sin romper, las masas de las partículas que observamos son cero. Los pequeños valores no nulos de las masas de las partículas están relacionados, por tanto, con la rotura de la supersimetría a la temperatura del mundo que observamos, bastante baja. Hay, sin embargo, razones de mucho peso que niegan que la formulación actual de la teoría de supercuerdas pueda explicar la rotura de la supersimetría y, por tanto, los valores precisos de las masas de las partículas observadas en los aceleradores de altas energías.

La resolución de esas dificultades exige, a buen seguro, dominar los principios profundos sobre los que se basa la teoría. En cierto sentido, el desarrollo de las teorías de supercuerdas sigue el camino opuesto al desarrollo de la relatividad general. En esta última, la estructura de la teoría se deduce de las penetrantes intuiciones de Einstein en la lógica de las leyes de la física. En las teorías de supercuerdas, se han atisbado primero algunos detalles y todavía andamos buscando a tientas alguna intuición unificadora sobre la lógica de la teoría. En este contexto, la aparición del gravitón sin masa y de las partículas de aforo que surgen de las teorías de supercuerdas parece fortuita y algo misteriosa; sería mejor que surgieran de manera natural en la teoría una vez estuvieran asentados los principios unificadores.

¿Cómo descubrir la lógica de la teoría de supercuerdas? Los principios de la relatividad general han de ser un caso particular de los principios, más generales, de la teoría de supercuerdas; en cierto sentido, la relatividad general puede servir de guía. Así, desarrollando una analogía con la relatividad general, se ha explicado antes cómo se espera que las teorías de supercuerdas extiendan la idea del espacio-tiempo ordinario al espacio de todas las posibles configuraciones de una cuerda. Esta idea es hoy objeto de intensa investigación. Más radical incluso es la sugerencia de que la teoría sólo debe estudiarse en su formulación bidimensional, prescindiendo de toda referencia a las coordenadas del espacio y el tiempo en que vivimos.

Sea cual sea la respuesta a estas posibilidades, el mejor conocimiento de la situación lógica de la teoría conducirá, sin duda, a profundos problemas matemáticos y físicos, y nos habrá de llevar también a un mayor dominio de las predicciones de la teoría de supercuerdas. Ante nosotros se presenta un tiempo de efervescencia intelectual y de rápidos avances.



14. POR ESPACIO DE VARIEDAD DE ORBITAS entendemos el altamente curvado y de seis dimensiones que sirve de fondo al movimiento de las cuerdas. Los diagramas representan una versión bidimensional de una variedad de órbitas. Una superficie cerrada, bidimensional, se ha estirado para formar tres puntas agudas: las singularidades cónicas. La superficie se supone plana en todas partes, excepto en las singularidades: puede cortarse y colocarse sobre un plano. De manera similar una variedad de órbitas de seis dimensiones es plana en todas partes, salvo en singularidades cónicas aisladas; allí, la curvatura es infinita. El agujero del centro de la superficie indica que la variedad de órbitas no mantiene una "conexión simple": puede cortarse sin dar lugar a dos trozos separados. Una trayectoria cerrada que rodee un agujero en las variedades de órbita hexadimensionales puede desenrollarse después de un número fijo de vueltas. Tales agujeros provocan que las líneas de potencial electromagnético asociadas con el grupo de simetría E_6 queden atrapadas (*curvas de color, a la izquierda*). La captura determina que E_6 se rompa en un grupo de simetría menor, similar al asociado al modelo estándar. Una cuerda cerrada que se mueva en una variedad de órbitas (*derecha*) lo hará libremente (*a*), pero puede también quedar atrapada de diversas maneras. Si rodea una singularidad cónica, la curvatura evita que se deshaga el bucle (*b*). Puede también rodear el agujero (*c*) o ceñir primero el agujero y después la singularidad cónica (*d*). Una cuerda que ciña el agujero produce partículas dotadas de masa y con carga eléctrica fraccionaria o monopolos magnéticos masivos con cargas magnéticas múltiples.

Ciencia y sociedad

Las raíces del hombre

Hasta hace poco, la interpretación más aceptada del árbol genealógico prehumano hablaba de dos ramas, que se separaron, tres millones de años atrás, a partir de un tronco común. Uno de los linajes (el de los australopitecinos) evolucionó, antes de extinguirse, en una raza de robustos vegetarianos, muy especializados. El segundo linaje culminaba en el hombre. Pero esta hipótesis ha quedado en entredicho con el descubrimiento, en Kenya, de un cráneo de 2,5 millones de años de antigüedad que no encaja en ninguna de las categorías aceptadas. El ancestro recién llegado obliga a aceptar que el árbol genealógico humano posee, por lo menos, tres ramas, a salvo de otras previsibles reagrupaciones.

El modelo de evolución de los homínidos que goza de aceptación mayoritaria (pero no unánime) fue avanzado, en 1979, por Donald C. Johanson, del Instituto del Origen del Hombre, y Timothy White, de la Universidad de California en Berkeley. Según esos autores, el antepasado común del que surgieron los linajes australopitecino y *Homo* protohumano era un primatoide bípedo: *Australopithecus afarensis*. Pruebas de la existencia de *A. afarensis*, entre otras el famoso esqueleto Lucy, se han recuperado en Hadar (Etiopía) y Laetoli (Tanzania).

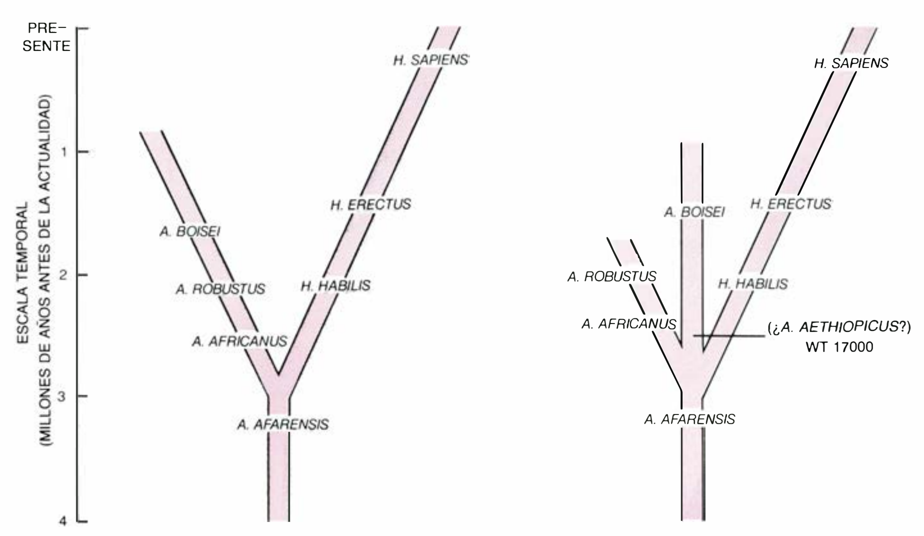
Las trazas más antiguas de *A. afarensis*, el ancestro común, lo retrotraen hasta hace 3,6 millones de años. Postula la hipótesis de Johanson y White que, poco después de hace tres millones de años, los descendientes de Lucy divergieron en su constitución genética. Una de las líneas se transformaría, en última instancia, en *Homo habilis*, el primer antepasado directo del hombre. La otra persistiría en los australopitecinos, atravesando la forma conocida por *A. africanus* y dando origen, en Africa meridional, a *A. robustus* y, en Africa oriental, a *A. boisei*. Ambas eran formas "robustas" de musculatura craneana y facial muy desarrollada, apta para la masticación de frutos y otros vegetales. Uno de los atractivos de la hipótesis de Johanson y White era ese aumento progresivo de la línea de los autralopitecinos hacia una morfología robusta.

El nuevo hallazgo, realizado por Alan Walker, de la Universidad de Johns Hopkins, rompe la continuidad de esa progresión. El cráneo recuperado por Walker, que se describe en un reciente artículo que publica *Nature*, es, en algunos aspectos, el más robusto de los descubiertos hasta hoy. En su pronunciada cresta debieron insertarse músculos temporales vigorosísimos, que aportarían gran potencia para la masticación de alimentos vegetales duros; pareja especialización revela la dentadura. Sin embargo, en otros aspectos el cráneo es muy primitivo; no sorprende, por tanto, que el análisis detallado de los estratos geológicos circundantes concedieran al cráneo una antigüedad de 2,5 millones de edad: muy superior a la de cualquier *A. boisei* conocido y similar a la de *A. africanus*. Por supuesto, el nuevo cráneo (catalogado en su museo con la signatura KNM-WT 17000) no puede descender de *A. africanus*.

¿Dónde situarlo? Walker y demás coautores que firman el trabajo (Richard E. F. Leakey, de los Museos Nacionales de Kenya, John M. Harris, del Museo de Historia Natural del Condado de Los Angeles, y Francis H. Brown, de la Universidad de Utah) opinan que WT 17000 es un *A. boisei* temprano que conjuga rasgos primitivos y evolucionados. Pero hay quien discrepa. Johanson señaló que el nuevo cráneo comparte casi igual número de rasgos con *A. afarensis* que con *A. boisei* y que constituye un excelente ejemplar de forma intermedia. En última instancia, afirmó, probablemente ha-



1. KNM-WT 17000, cráneo de homínido hallado en Kenya que ha obligado a replantearse la interpretación aceptada de la evolución humana. El ejemplar, descubierto por Alan Walker, de la Universidad de Johns Hopkins, ronda los 2,5 millones de años de antigüedad. Ciertas partes de WT 17000 aparecen muy especializadas en los hábitos vegetarianos; así, la cresta sagital, donde debía insertarse una potente musculatura maxilar apta para la masticación de alimento vegetal. Otros rasgos, por ejemplo la prominencia del rostro, son primitivos. La fotografía, tomada por Walker, se reproduce aquí con permiso de Nature



2. *REDISTRIBUCION MINIMA del árbol genealógico humano de aceptación mayoritaria (***izquierda***) necesaria para acomodar a* WT *17000 y que consiste en la adición de una tercera rama (***derecha***). La nueva ramificación parte del primitivo* Australopithecus afarensis *hacia la forma vegetariana especializada* A. boisei. *Discurre en paralelo a otro linaje vegetariano y a la línea* Homo *prehumana.* WT *17000 quizá defina una nueva especie:* A. aethiopicus. *El diagrama se inspira en otro publicado por* Science

bría que considerarla una especie autónoma derivada de *A. afarensis* y anterior a *A. boisei*. De ser así, la reorganización mínima del árbol genealógico necesaria para acomodar la nueva especie consistiría en añadirle una nueva línea de descendencia que fuera de WT 17000 a *A. boisei*, en paralelo a la línea *A. africanus–A. robustus* y al linaje *Homo*.

A la vez que resuelve un problema, esa redistribución crearía otros. La estrecha semejanza entre las especies robustas en lo que atañe a su adaptación vegetariana había provocado su inclusión en una misma línea filogenética. El nuevo árbol que se propone obliga a aceptar que se registró la misma adaptación por partida doble, lo cual, de ser cierto, constituiría un notable grado de evolución paralela. Es más, sigue sin esclarecerse la cuestión fundamental: el origen del linaje *Homo*. La existencia de un enorme vacío en el registro fósil ha impedido hasta hoy determinar si la línea *Homo* salió del tronco de la de los australopitecinos; no parece que el nuevo especimen se encuentre cerca del nudo de ramificación.

En efecto, para algunos observadores, el valor de WT 17000 (en óptimo estado de conservación) reside, principalmente, en que, al cuestionar hipótesis que gozaban de aceptación mayoritaria, ha allanado el terreno para la formulación de otras nuevas. Johanson va más allá. "El nuevo cráneo", afirma, "no excluye que *afarensis* sea ancestro de *boisei*; ni que lo sea de *Homo*. La mayoría acepta, entiendo, que *afarensis* sea el antepasado común de las tres líneas. Lo que logra este especimen (cuyo descubrimiento, por cierto, me parece de lo más interesante) es instar a la modificación del árbol genealógico. Y así ocurre siempre en este campo cuando aparece algo que nadie esperaba".

Retorno a la materia oscura

El universo contiene muchísima más materia de lo que aparenta, según datos experimentales y teóricos. ¿Dónde se oculta esa "materia oscura"? ¿En qué consiste? Duane A. Dicus, de la Universidad de Texas en Austin, y Vigdor L. Teplitz, de la Agencia norteamericana de Control de Armamentos y Desarme y de la Universidad de Maryland, acaban de proponer una nueva solución a ese viejo problema.

Señalan los autores, en un escrito publicado en *Physical Review D*, que en realidad son dos los problemas astrofísicos relativos a la materia oscura: uno de pequeña escala y otro de gran escala. El primero tiene que ver con el movimiento de las estrellas en el interior de las galaxias y de las galaxias en el seno de los cúmulos galácticos. Los estudios de esos movimientos estelares indican que las galaxias y los cúmulos podrían alojar hasta 10 veces más materia de la que resulta visible.

El neutrino encabeza una larga lista de partículas involucradas, a pequeña escala, en la masa que se echa a faltar. Se ha hablado también de partículas de existencia supuesta, como los axiones, postulados por algunas teorías de gran unificación. Otra teoría, la de la supersimetría, propone que por cada partícula conocida habría otra, de distinto espín y masa muy superior; el fotino, el "supercompañero" del fotón, sería otro candidato que diera cuenta de la masa oscura. Una opción más: la materia extraña, que consta de quarks arriba (*up*), abajo (*down*) y extraño (*strange*), enlazados en aglomerados de tamaño ilimitado. (La materia ordinaria, por el contrario, la forman tripletes de quarks; el protón, por ejemplo, está constituido por dos quarks arriba y uno abajo.)

Los problemas a gran escala atañen al movimiento global del universo. En particular, la teoría dominante (o modelo de la gran explosión) postula que el universo surgió, hace entre 15.000 y 20.000 millones de años, a partir de una explosión primordial, y desde entonces sigue expandiéndose. ¿Qué destino aguarda al universo? ¿Persistirá indefinidamente esa expansión o llegará a detenerse por efecto de la gravedad, que aproximará de nuevo entre sí las galaxias? La respuesta yace en la densidad total de materia que contiene el universo. Según los cálculos actuales, esa densidad es 20 veces menor que la densidad crítica necesaria para que las galaxias tornen a juntarse. Sin embargo, en los modelos de universo más recientes —las teorías inflacionarias— se postula una densidad de materia muy cercana a la crítica. ¿Cómo explicar esa discrepancia? Sugieren los astrónomos que quizá la cifra de regiones de materia oscura supere ampliamente a la de galaxias luminosas. Se ha avanzado también que la masa que falta se hallaría en los productos de desintegración de las partículas pesadas.

El trabajo de Dicus y Teplitz parte de esa última hipótesis, que investigó pormenorizadamente Michael S. Turner, de la Universidad de Chicago. Según entienden ambos autores, la resolución de los problemas a pequeña y gran escala quizá resida en la misma especie de partículas. Demuestran que si una especie de partículas posee una vida de varios miles de millones de años, sus partículas dotadas de masa que no se hayan desintegrado aún resolverían el problema de la materia oscura a pequeña escala, mientras que sus productos de desintegración resolverían el de gran escala. Así, un neutrino muónico pesado, o neutrino tau, podría desintegrarse en un neutrino electrónico. No menos de 17 grupos están empeñados en determinar si los diversos neutrinos poseen masa y, en caso afirmativo, si su valor bastaría

para resolver los problemas de la masa oscura. No se restringen los candidatos a los neutrinos; de existir los axiones y otras partículas exóticas (los familones, por ejemplo), estos últimos podrían desintegrarse también en particulas más ligeras.

Tolerancia adquirida

Desde que los biólogos moleculares descubrieron cómo transferir genes foráneos a vegetales, se vislumbró la posibilidad de explotar esa técnica para promover la resistencia de los cultivos a los herbicidas, cuya aplicación no alteraría la cosecha. Se ha dado ya el primer paso hacia ese objetivo.

El potente herbicida glifosato mata las plantas por inactivación de la enzima EPSP sintetasa, que cataliza la síntesis de gran número de proteínas. Las células vegetales normales poseen una sola copia del gen que determina la EPSP sintetasa. Dilip M. Shah y un equipo de colaboradores de la compañía Monsanto han cultivado una línea de células de petunia (*Petunia hybrida*) en cantidades crecientes de glifosato. Las células adquirieron tolerancia al herbicida. Según se comprobó, la base molecular de la tolerancia consistía en una superproducción de EPSP sintetasa: en presencia del herbicida, las células provocaron la multiplicación del gen que determina la enzima, hasta obtener 20 copias del mismo por célula.

Informan los investigadores en *Science* que aislaron y clonaron el gen de la EPSP sintetasa y, por medio de técnicas de ADN recombinante, obtuvieron un autorreplicador automático. Para ello, agregaron al gen una región "promotora" tomada del ADN del virus del mosaico de la coliflor. El promotor facilita la rápida replicación del virus durante su ataque a la planta; se había demostrado que insta también una elevada producción de genes foráneos al vegetal. Se engarzó entonces el gen recombinante en una plásmido (pequeño anillo de ADN) de *Agrobacterium tumefaciens*, bacteria dotada de capacidad para infectar las células vegetales, disponiéndose así de un vehículo para inocular el plásmido en plantas [véase "Un vector para introducir genes en vegetales", por Mary-Dell Chilton; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1983]. En efecto, al infectar células normales de petunia con bacterias portadoras del plásmido recombinante, el gen de la EPSP sintetasa obtenido por ingeniería genética se transfirió a las células vegetales.

Se observó que, en las células de petunia "transformadas", una única copia del gen venía a desempeñar la función que correspondía a la presencia de muchas de ellas: elaboraba más cantidad de EPSP sintetasa de la que pudiera inactivar una dosis elevada de glifosato. En presencia del herbicida, las células transformadas desarrollaban callos irregulares. Las plantas nacidas de los callos crecían aunque se las rociara con dosis dobles o cuádruples de la presentación comercial del herbicida glifosato, que aniquilaron el 100 por ciento de un grupo de control de petunias que no recibieron tratamiento.

La barrera hematoencefálica

Los capilares del cerebro difieren de los de otros órganos. Gracias a sus propiedades únicas actúan de celadores entre la sangre y el cerebro. Trabajos recientes muestran cómo lo logran

Gary W. Goldstein y A. Lorris Betz

En los seres humanos y en otros organismos complejos la vida depende de la homeostasis, es decir, del mantenimiento de un medio interno estable. Tal dependencia se deja sentir sobre todo en el cerebro. En otras partes del cuerpo las concentraciones extracelulares de hormonas, aminoácidos e iones (potasio por ejemplo) sufren a menudo leves fluctuaciones, en particular después de las comidas o del ejercicio físico. Si el cerebro estuviera expuesto a esos cambios, podría perderse el control de la actividad nerviosa, pues algunas hormonas y aminoácidos actúan de neurotransmisores y el ion potasio altera el umbral de excitabilidad de las neuronas. En consecuencia, el cerebro debe mantenerse rigurosamente aislado de los cambios transitorios en la composición de la sangre.

¿Cómo se lleva a cabo esa proeza? La respuesta reside en la peculiar estructura de los capilares que aportan sangre a los tejidos cerebrales. Las células de los capilares del cerebro, a diferencia de las de otros capilares, forman una pared continua que impide la entrada de muchas sustancias al cerebro. La pared capilar, ininterrumpida, constituye el soporte de la barrera hematoencefálica, cuya existencia se demostró de modo concluyente en la década de 1960. Separando el cerebro de otros tejidos, la barrera cumple una función muy importante. Ahora bien, si el aislamiento fuera completo, el cerebro moriría por falta de alimento. Afortunadamente los nutrientes esenciales atraviesan sin dificultad la barrera hematoencefálica, ayudados por sistemas de transporte que reconocen ciertas moléculas y las llevan hasta el interior del órgano.

Gran parte de los últimos trabajos sobre la barrera hematoencefálica, incluido el nuestro propio, se han centrado en los sistemas de transporte. Se ha puesto de manifiesto la existencia de varios tipos de transportadores, cada uno de los cuales cumple una función específica. Los sistemas de transporte no sólo introducen nutrientes en el cerebro, sino que también bombean al exterior las sustancias en exceso, ayudando así a mantener un ambiente constante para las neuronas. Hemos identificado muchos de los transportadores de la pared capilar, valiéndonos al efecto de métodos desarrollados recientemente para aislar los capilares cerebrales. Nuestro trabajo, junto con el de otros investigadores, está empezando a sacar a luz de qué manera la barrera hematoencefálica crea el ambiente inalterable que necesita el cerebro. Dado que necesariamente debe traspasarse esa barrera para tratar ciertas enfermedades que afectan al cerebro, los recientes hallazgos revisten especial interés para la terapéutica médica, así como para estudios biológicos fundamentales.

El concepto de barrera

Nuestro conocimiento actual de la barrera hematoencefálica culmina una larga línea de investigación. El concepto de barrera surgió en el siglo XIX, cuando el bacteriólogo alemán Paul Ehrlich observó que, administrando por vía intravenosa ciertos colorantes a animales pequeños, se teñían todos los órganos excepto el cerebro. Ehrlich interpretó el resultado suponiendo que el cerebro poseía menos afinidad por el colorante que los demás tejidos. En 1913, Edwin E. Goldmann, que fue discípulo de Ehrlich, demostró el error de su maestro. Goldmann inyectó el colorante azul trípano directamente en el líquido cefalorraquídeo de conejos y perros. Administrado por esta vía, el colorante teñía de inmediato el cerebro entero, pero no pasaba al torrente sanguíneo, y por tanto no teñía los demás órganos internos. Goldmann demostró así que el sistema nervioso central estaba separado de la sangre por algún tipo de barrera.

El hallazgo de Goldmann ayudó a los fisiólogos a descifrar ciertos resultados, interesantes aunque enigmáticos, obtenidos algunos años antes por otros investigadores. En 1898, A. Biedl y R. Kraus descubrieron que los ácidos biliares, que no son neurotóxicos cuando se inoculan por vía intravenosa, producían sin embargo ataques nerviosos y coma si se inyectaban directamente en el cerebro. Dos años después, M. Lewandowsky obtuvo un resultado similar con el ferrocianuro sódico. Al explicar esos descubrimientos los tres investigadores demostraron poseer notable intuición, pues atribuyeron sus resultados a propiedades especiales de permeabilidad de los pequeños vasos sanguíneos del cerebro.

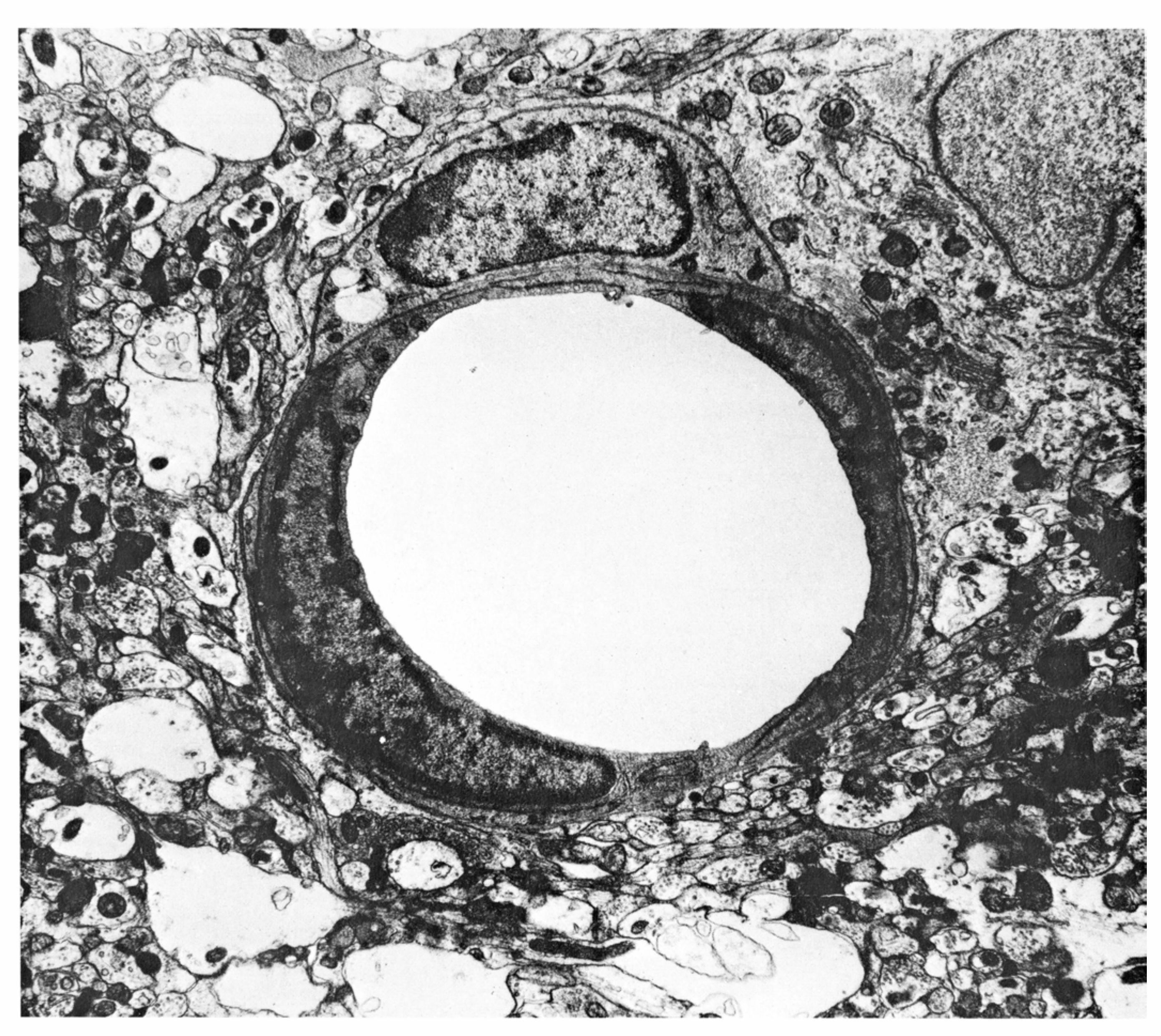
La hipótesis postulada por Goldmann, según la cual los capilares del cerebro constituían la base anatómica de la barrera, no pudo confirmarse de inmediato. A principios del siglo XX no se disponía de métodos para examinar la ultraestructura fina de los vasos sanguíneos. En la década de los 50, el microscopio electrónico vino a suplir esa carencia y pronto se aplicó al estudio de los capilares cerebrales. El microscopio electrónico reveló que las células endoteliales que forman el tubo capilar se unen entre sí por lo que se conoce como uniones estrechas continuas. En circunstancias normales, toda célula animal está limitada por su propia membrana externa, que a su vez presenta dos hojas, o capas. En una unión estrecha se funden las hojas externas de dos células continuas, de suerte que las células quedan unidas por un vínculo físico.

Las uniones estrechas continuas no constituyen la única característica distintiva de los vasos sanguíneos del cerebro. En algunos órganos, las células de la capa endotelial presentan huecos o canales a lo largo de toda la capa; en

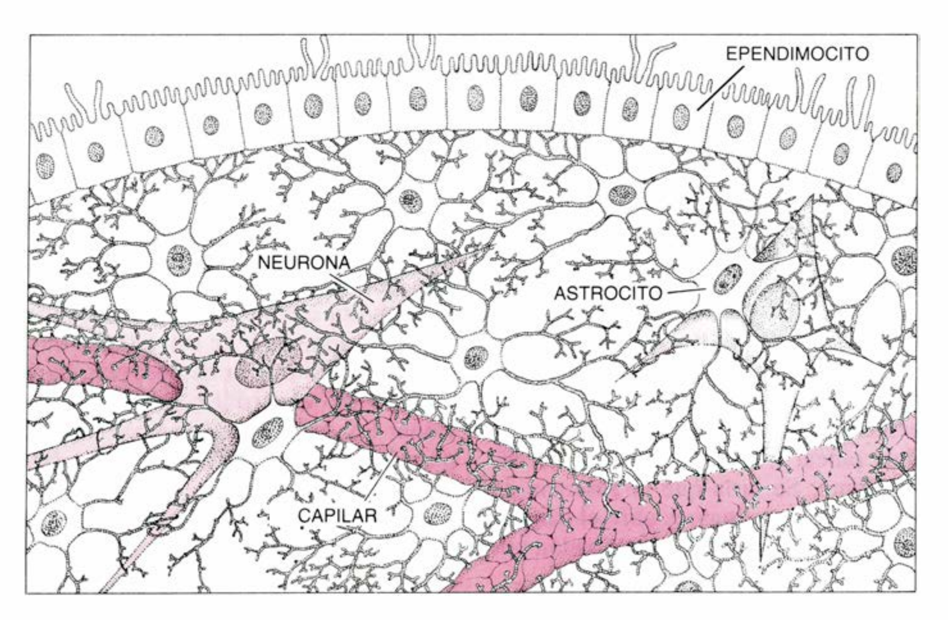
el cerebro no aparecen tales canales. Por otra parte, los capilares del cerebro están casi completamente rodeados por ciertas prolongaciones (extensiones largas y finas) de las células cerebrales llamadas astrocitos. Los astrocitos pertenecen a una clase más amplia de células cerebrales –las células gliales– que, entre otras funciones, sintetizan la mielina que envaina algunas neuronas. Las prolongaciones de los astrocitos sostienen a los capilares; de ahí que algunos de los primeros investigadores supusieran que esas células constituían la barrera hematoencefálica. Aunque se ha demostrado la falsedad de tal hipótesis, la función exacta de los astrocitos sigue siendo aún objeto de debate.

A medida que se acumulaba información sobre la ultraestructura de los capilares del cerebro, resultaba más evidente que los microvasos dotados de esas características distintivas no se encontraban por todo el cerebro. En seis o siete pequeñas regiones del mismo existen una serie de huecos o canales que se extienden a través del endotelio, lo que permite a las sustancias de la sangre alcanzar el líquido extracelular del cerebro, o las propias neuronas. Entre las zonas sin barrera hematoencefálica se cuentan la hipófisis, la glándula pineal y algunas regiones del hipotálamo. Se diría que la ausencia de barrera en esos lugares abre el camino para que las hormonas que circulan por la sangre lleguen a las neuronas secretoras del cerebro, cerrando así el circuito que sirve de base a los mecanismos de retroalimentación de los sistemas neuroendocrinos.

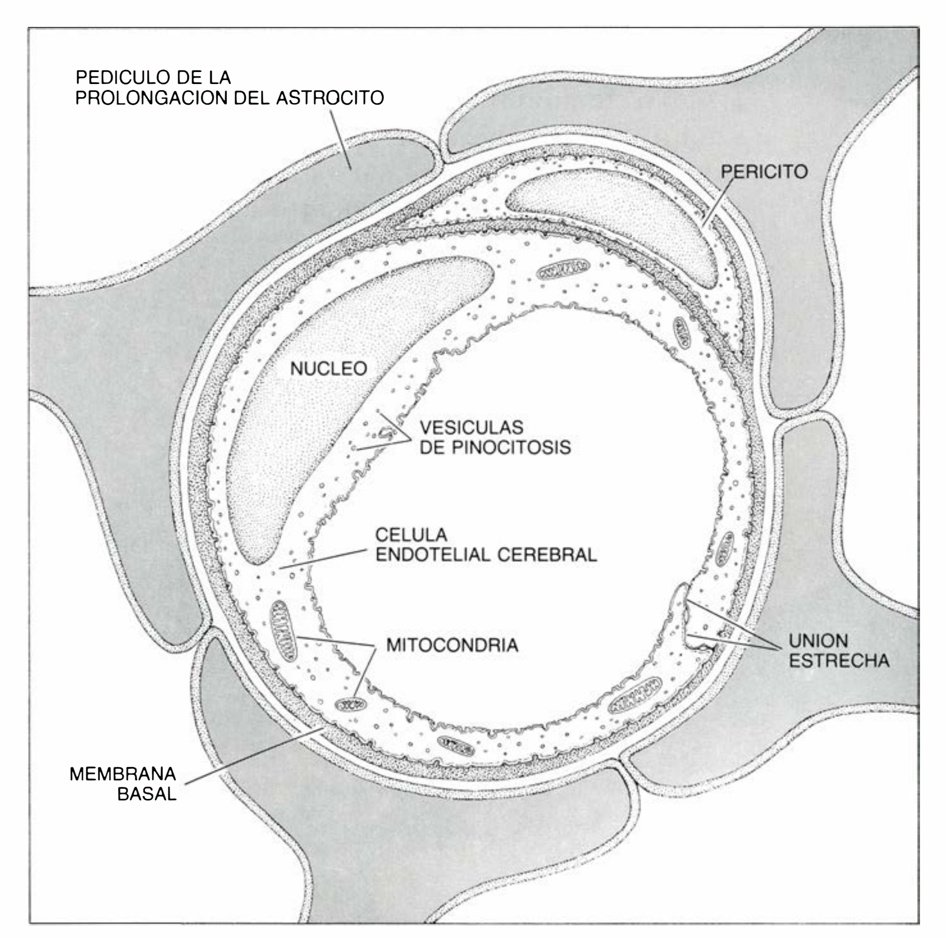
La microscopía electrónica proporcionó, en los años 50, una información mucho más detallada sobre la estructura de los capilares de la que se disponía hasta entonces. En la década de los 60, el desarrollo de marcadores moleculares susceptibles de observación al microscopio electrónico permitió relacionar los detalles estructurales recién descubiertos con la función de la barrera hematoencefálica. Uno de esos trazadores es la enzima peroxidasa de rábano, de dimensiones similares a las



1. CAPILARES CEREBRALES mostrados en corte transversal; revelan las estructuras anatómicas que proporcionan el soporte de la barrera hematoencefálica. Las dos estructuras grandes, con forma de media luna, que constituyen la pared del capilar son células endoteliales. En la parte superior y en la inferior, ligeramente a la derecha, están unidas por prolongaciones delgadas que se solapan entre sí. Es ahí donde las membranas externas de las células endoteliales se funden parcialmente formando "uniones estrechas" que impiden la difusión libre de las sustancias de la sangre hacia el interior del cerebro. La célula adosada a la parte superior del capilar es un pericito; todavía no se conoce plenamente su función. El tamaño real del capilar, de la corteza cerebral de una rata, se ha aumentado unos 10.000 diámetros en esta microfotografía de P. A. Cancilla, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Los Angeles.



2. ASTROCITOS, células cuyas largas prolongaciones se ponen en contacto con diversos tipos de células cerebrales, mostradas esquemáticamente en este dibujo. Las prolongaciones del astrocito establecen contacto con las neuronas y con las células del epéndimo que revisten los ventrículos, que son huecos situados en el centro del cerebro. Además, todos los capilares del cerebro suelen estar en contacto con varios astrocitos. Los astrocitos son miembros de la más amplia clase de células cerebrales: las células gliales. Aunque su función no se conoce aún en detalle, podrían influir sobre la permeabilidad de los capilares cerebrales.



3. PEDICULOS DE LAS PROLONGACIONES DE LOS ASTROCITOS, que rodean casi completamente los capilares del cerebro. Al advertirse esa relación se creyó en tiempos que los astrocitos formaban la barrera hematoencefálica. Sabemos ahora que las propias células endoteliales constituyen la barrera. Las células endoteliales transportan selectivamente los nutrientes hasta el interior del cerebro, mientras que las numerosas mitocondrias que se encuentran en su citoplasma probablemente proporcionan la energía necesaria para el transporte. Las células endoteliales del cerebro tienen pocas vesículas de pinocitosis. En otros órganos, tales vesículas pueden proporcionar el transporte, relativamente poco selectivo, a través de la pared capilar.

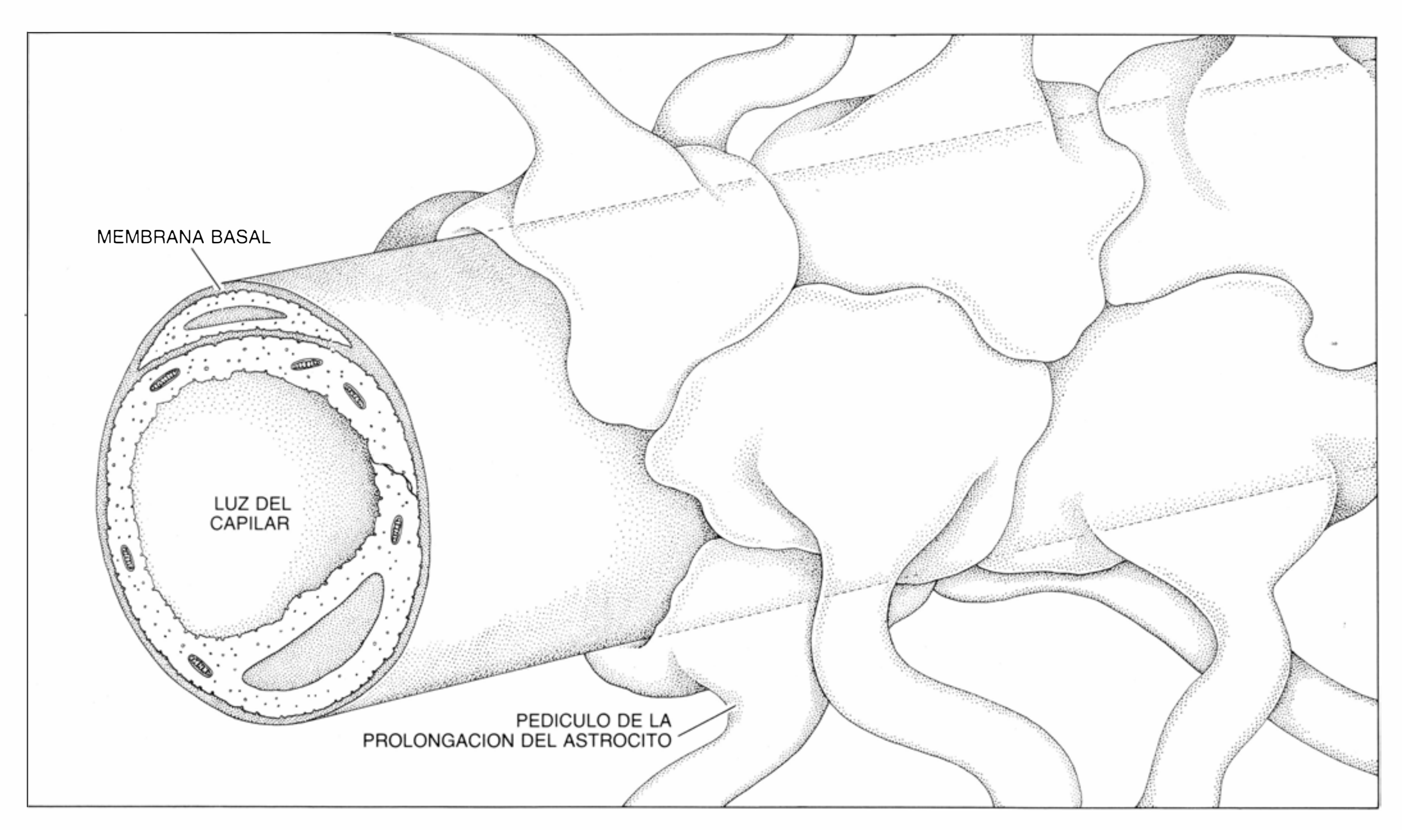
proteínas que suele haber en la sangre. Cuando se expone la peroxidasa a un reactivo específico, los fragmentos electrodensos de la proteína forman una mancha oscura que facilita la localización del trazador.

Thomas S. Reese y Morris J. Karnovsky, de la Facultad de Medicina de Harvard, emplearon la peroxidasa de rábano en una versión moderna de los primeros experimentos con azul trípano. La inyectaron en sangre y, al cabo de cierto tiempo, procedieron a examinar el cerebro al microscopio electrónico. En la mayoría de los órganos la peroxidasa atraviesa fácilmente la pared capilar por los canales y huecos que quedan entre las células endoteliales, o la capturan pequeñas cápsulas llamadas vesículas pinocíticas, que a su vez penetran en esas mismas células endoteliales. Por el contrario, las uniones estrechas entre células endoteliales frenaban la entrada de la peroxidasa en el cerebro, y sólo una pequeña fracción de la proteína se introducía en el endotelio en forma de vesículas.

Poco después de esa espectacular demostración, Reese se trasladó al Instituto Nacional norteamericano de Enfermedades Neurológicas, de la Comunicación y Apoplejía, donde se le unió Milton W. Brightman. Conjuntamente desarrollaron un experimento que, en cierto sentido, era el inverso del realizado por Reese y Karnovsky en Harvard. Se inyectó la peroxidasa de rábano en el interior de uno de los ventrículos cerebrales, que son cavidades situadas en el centro del cerebro. La peroxidasa impregnó el líquido cefalorraquídeo de los ventrículos y fluyó hacia los espacios extracelulares del cerebro. Sin embargo, las uniones estrechas entre las células endoteliales impidieron que abandonara el cerebro. El estudio venía a demostrar que los astrocitos no se oponían al movimiento de salida de la proteína. Es más, junto al trabajo que Reese realizó con Karnovsky, estableció fuera de toda duda que el endotelio constituía la localización anatómica de la barrera hematoencefálica.

¿Cómo pasan los nutrientes?

Una vez establecida la existencia de la barrera y su base estructural, los investigadores enfocaron sus trabajos hacia la siguiente fase: descubrir cómo conseguían las moléculas necesarias para el metabolismo cerebral atravesar la barrera. Había que empezar por determinar qué sustancias lo lograban y



4. ENFUNDAMIENTO DEL CAPILAR por parte de los pedículos de las prolongaciones de los astrocitos, que configuran un patrón en sierra. La membrana basal sostiene junto a sí al endotelio y ayuda a mantener su forma tubular. La luz del capilar a menudo presenta la anchura justa para que pase un glóbulo rojo sanguíneo; por ser la extensión más fina del sistema vascular, el capilar constituye el lugar donde se produce el intercambio entre la sangre y los tejidos.

cuáles no. Con ese objetivo, fisiólogos y bioquímicos se pusieron a trabajar con nuevos métodos de localización de moléculas en tejidos, en los que se empleaba el marcaje radiactivo de compuestos.

Algunos de los primeros experimentos se basaban en la utilización de dos sustancias radiactivas diferentes. Una de ellas era un compuesto de referencia, que, o bien penetraba en el cerebro casi por completo, o bien no penetraba en absoluto. El otro compuesto era la sustancia sometida a ensayo. Su tasa de penetración se comparaba con la de la molécula de referencia, midiendo la concentración de ambos compuestos en las venas procedentes del cerebro o en el cerebro mismo.

Se realizaron pruebas de esa clase para muchas sustancias y se encontró que ciertas propiedades químicas determinaban con qué facilidad una molécula entraba en el cerebro. El factor más importante es la liposolubilidad, que viene a equivaler a la facilidad con que una sustancia se disuelve en aceite. Las moléculas liposolubles atraviesan sin dificultad la barrera hematoencefálica y penetran en el cerebro. Entre ese tipo de sustancias se cuentan la nicotina, el etanol y la heroína, lo cual podría explicar el frecuente abuso que se hace de esos compuestos. Por otra parte, los compuestos muy solubles en agua no suelen introducirse en el cerebro; este descubrimiento es aplicable a un amplio conjunto de moléculas, desde proteínas del tamaño de la albúmina hasta iones pequeños, como el sodio.

La razón por la cual las sustancias liposolubles son capaces de traspasar la barrera hematoencefálica residen en que las capas de la membrana celular, incluidas las del endotelio capilar, están compuestas por moléculas lipídicas. Cada molécula lipídica consta de dos partes: cabeza y cola; aquélla, de pequeñas proporciones, se une a dos largas cadenas hidrocarbonadas que forman la cola. Cada capa de la membrana celular está compuesta por gran número de moléculas lipídicas, empalmadas unas a continuación de otras y dispuestas con sus cabezas orientadas hacia el exterior. La membrana completa está constituida por dos capas de ese tipo en aposición. Las moléculas lipídicas no están unidas rígidamente entre sí. Antes bien, se mueven libremente y, por consiguiente, configuran una estructura semejante a un líquido bidimensional. Unicamente las sustancias capaces de disolverse en los lípidos pueden difundirse a través de ese líquido bidimensional, y sólo las moléculas que atraviesan las membranas de las células endoteliales pueden entrar en el cerebro.

En cualquier caso, el cerebro también necesita para su funcionamiento sustancias no liposolubles, como la glucosa, fuente principal de energía para las células cerebrales, y ciertos aminoácidos que esas células no pueden sintetizar por sí mismas. Dado que estas sustancias no son solubles en los lípidos, no pueden cruzar la barrera por mera difusión. Todo nutriente esencial debe ser reconocido y conducido a través de la membrana por un transportador específico para esa molécula. El principio de especificidad fue establecido para el transportador de la glucosa en un trabajo que puso de manifiesto la elegancia con que actúan los sistemas de transporte discriminadores.

Transporte de nutrientes

Christian Crone, de la Universidad de Copenhague, comparó la proporción con que atravesaban la barrera hematoencefálica dos estereoisómeros de la glucosa, denominados D-glucosa y L-glucosa. Los isómeros son moléculas constituidas por los mismos átomos, ordenados de manera diferente; los estereoisómeros son imágenes especulares uno de otro. El organismo tolera igual la D-glucosa que la L-glucosa,

pero sólo la molécula D presenta actividad biológica. Crone descubrió que el endotelio era capaz de distinguir los estereoisómeros. Aunque el tejido cerebral extraía gran parte de la D-glucosa de la sangre, no tomaba L-glucosa. Resultado que difería notablemente del observado en los músculos, donde ambos isómeros penetraban con igual facilidad. Crone concluyó que un sistema de transporte muy específico introducía la D-glucosa en el cerebro, y a continuación propuso lo que a la sazón constituía una original hipótesis: el transportador residía en el endotelio de los capilares del cerebro.

Nuestra colaboración dio comienzo tras habernos interesado por separado en la barrera hematoencefálica, durante nuestro período de formación experimental. La curiosidad de uno de nosotros (Betz) se despertó durante sus trabajos de doctorado en el laboratorio de David D. Gilboe, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Wisconsin en Madison. Con una versión modificada de la técnica de extracción, Betz descubrió que el sistema cerebral de transporte de glucosa compartía algunas propiedades con el sistema que introduce glucosa en los hematíes, mejor conocido. Como en éstos, el transporte de glucosa hasta el cerebro aumenta con la concentración de glucosa en el suero de la sangre, pero sólo hasta cierto nivel. Por encima de ese máximo, la cuantía del transporte se estabiliza; en consecuencia, se dice que el sistema es saturable. De forma análoga a lo que sucede en el sistema de las células sanguíneas, el del cerebro lo inhibe la droga citocalasina *B* y no resulta afectado por la insulina.

Sin embargo, ni la técnica de extracción ni ninguna otra en la que se emplearan animales vivos podía avanzar el trabajo mucho más allá, dado que todos esos métodos adolecen de una limitación crucial: la presencia de células cerebrales entorpece las observaciones del endotelio capilar. Para observar el funcionamiento de la barrera hematoencefálica sin influencias perturbadoras era necesario estudiar los capilares en ausencia de otros tejidos. No se disponía por entonces de técnicas adecuadas para aislar los microvasos intactos del tejido cerebral que los rodea, de modo que uno de nosotros (Goldstein), que, tras doctorarse, investigaba en el laboratorio de Ivan Diamond, del Hospital Clínico de la Universidad de California en San Francisco, empezó a desarrollar una. Su trabajo se vio acompañado por el éxito; poco después juntamos nuestras fuerzas y, primero en San Francisco y después en la Universidad de Michigan, empezamos nuestro estudio de la barrera hematoencefálica.

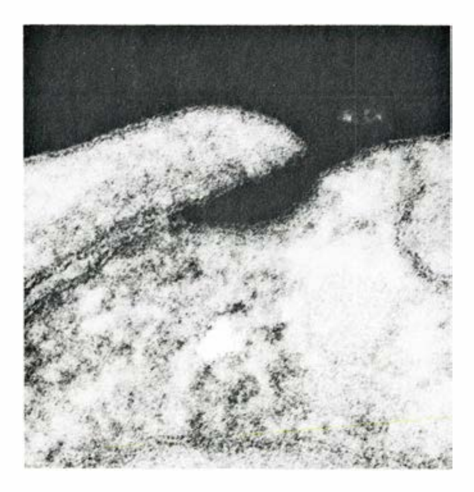
Transportadores

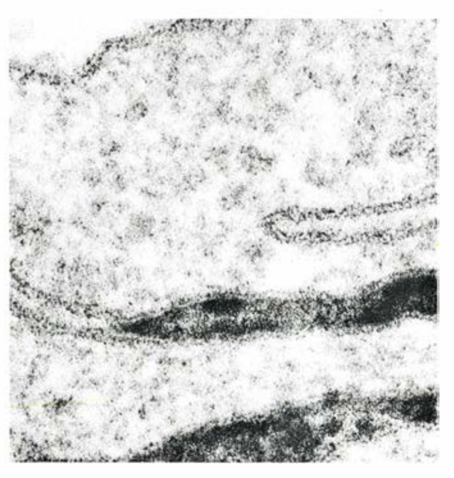
Nuestro primer proyecto en común consistió en ahondar en el descubrimiento de Betz acerca de la convergencia entre el sistema de transporte de glucosa de los capilares cerebrales y de los hematíes. Trabajando con capilares aislados, demostramos que, en efecto, ambos sistemas de transporte eran muy parecidos. Por otra parte, midiendo la cantidad de glucosa transportada hasta el interior de las células endoteliales y comparándola con la cantidad que metaboliza el endotelio, probamos que tan sólo una pequeña parte de la glucosa que entraba en las células endoteliales se consumía en ellas. De lo cual se deducía que la mayor parte del azúcar que pasaba al interior del endotelio se utilizaba como combustible de la actividad cerebral. Esos resultados constituían la primera confirmación directa de la hipótesis de Crone, según la cual la glucosa penetraba en las células endoteliales a través de la membrana del lado de la "sangre" y las abandonaba a través de la membrana del lado del "cerebro". (Por llamarse luz el interior de los vasos, la membrana que queda en contacto con la sangre se adjetiva luminal y, la que está en contacto con el tejido cerebral, antiluminal.)

A medida que iban poniéndose de manifiesto las características del sistema de transporte, nuestra atención fue centrándose en los propios transportadores. S. I. Harik, de la Universidad Case Western Reserve, ha utilizado recientemente citocalasina *B* de sonda para medir el número de transportadores de glucosa del endotelio y ha descubierto que todas las células endoteliales poseen abundantes zonas de transporte, lo cual ayuda a explicar que el capilar extraiga de la sangre cantidades tan importantes de glucosa. Sin embargo, no se conoce bien qué moléculas llevan a cabo esa tarea. Sin duda los transportadores están compuestos de proteínas que atraviesan la membrana celular y forman un canal a través del cual pasa la glucosa, pero la constitución precisa y la configuración de las proteínas son todavía objeto de investigación.

Una de las razones por las que fue la glucosa la primera molécula cuya entrada en el cerebro se estudió en detalle estriba en su concentración; se trata del único compuesto de sus características que está presente en cantidades importantes en la sangre. Los aminoácidos ofrecen una perspectiva mucho más compleja. Los 20 tipos de aminoácidos que componen las proteínas pueden clasificarse atendiendo a sus propiedades químicas que, en gran medida, vienen determinadas por las "cadenas laterales" que se unen a la estructura común de todos los aminoácidos. Entre las categorías en las que se encuadran los aminoácidos se cuentan la de los neutros grandes, neutros pequeños, la de los básicos y la de los ácidos.

La diferencia entre el destino de los

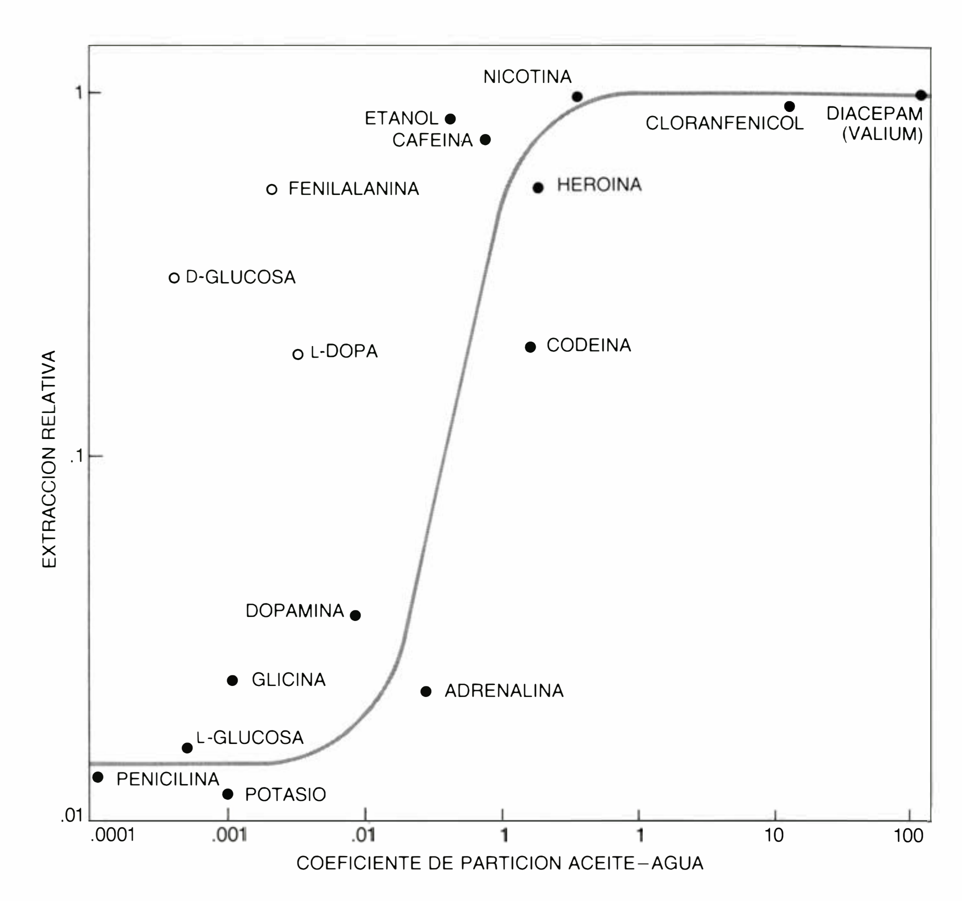




5. FUNCIONAMIENTO DE LA BARRERA, captado por las clásicas microfotografías electrónicas cuya publicación en la década de 1960 demostró que las uniones estrechas entre las células endoteliales proporcionaban la base de la barrera hematoencefálica. En ambas microfotografías se muestra la unión entre dos células endoteliales de un capilar de cerebro de ratón; las membranas de las células aparecen como estrechas líneas dobles. En las dos imágenes la luz del capilar se encuentra en la parte superior y, el tejido cerebral, en la inferior. Las regiones oscuras son las manchas electrodensas generadas por la peroxidasa de rábano. Cuando el colorante se inyecta en las arterias que irrigan el cerebro, alcanza la luz del capilar, pero las uniones estrechas (*izquierda*) impiden su entrada en el cerebro. Cuando se inyecta en el líquido cefalorraquídeo, penetra en las hendiduras que quedan entre las células endoteliales, hasta que la frena la unión estrecha (*derecha*). La microfotografía de la izquierda fue realizada por Thomas S. Reese y Morris J. Karnovsky, de Harvard. La de la derecha la tomaron Reese y Milton W. Brightman, del Instituto Nacional de Enfermedades Neurológicas, de la Comunicación y Apoplejía, cuando colaboraban en ese centro.

aminoácidos neutros grandes y el de los neutros pequeños pone de manifiesto la complejidad del sistema que introduce los aminoácidos en el cerebro. Los aminoácidos neutros grandes, de especial importancia en el cerebro, se requieren para la síntesis de neurotransmisores y proteínas. William H. Oldendorf y William M. Pardridge, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Los Angeles, quienes han desarrollado gran parte de los trabajos realizados en este campo, descubrieron la existencia de un transportador específico para los aminoácidos neutros grandes. Además de ese sistema, Oldendorf y Pardridge describieron otro transportador específico para aminoácidos, en concreto para las moléculas básicas y ácidas. En el caso de los neutros grandes, al menos diez de ellos compiten para entrar en las células endoteliales mediante el mismo mecanismo de transporte.

Al igual que sucede con los transportadores de la glucosa, los transportadores de los aminoácidos neutros grandes se encuentran en las membranas luminal y antiluminal y, por tanto, están capacitados para acarrear esos aminoácidos "esenciales", a través del endotelio, hasta el interior del cerebro. Por el contrario, los aminoácidos neutros pequeños no se transportan de la sangre al cerebro. Lo que quizá no debiera sorprendernos, pues las células cerebrales tienen capacidad para sintetizar esas moléculas y, por tanto, no resultan "esenciales". Más aún, al menos uno de los miembros del grupo –la glicina– es un potente neurotransmisor inhibidor cuya concentración en el líquido que rodea a las neuronas debe mantenerse a niveles mucho más bajos que los que presenta en la sangre. Las propiedades de transporte de que está dotado el endotelio capilar desempeñan un papel central en el mantenimiento de ese equilibrio.



6. LIPOSOLUBILIDAD es la propiedad química que mayor efecto ejerce sobre la capacidad de una sustancia para atravesar la barrera hematoencefálica. Los lípidos son moléculas de grasa. La liposolubilidad de un compuesto se valora por el modo en que se distribuye en una mezcla de aceite y agua (*eje horizontal*). La capacidad para cruzar la barrera se determina según la facilidad con que la molécula entra en el cerebro en comparación con otras que, según se sabe, entran sin dificultad (*eje vertical*). En la mayoría de sustancias, la facilidad de paso está determinada principalmente por su liposolubilidad (*círculos negros*). Sin embargo, ciertas moléculas necesarias para el metabolismo del cerebro cruzan la barrera con más facilidad que la que se supondría exclusivamente en función de su liposolubilidad (*círculos blancos*). Esos compuestos atraviesan la barrera por medio de un sistema de transporte. La mayoría de los datos del gráfico los ha obtenido William H. Oldendorf, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Los Angeles.

Transporte asimétrico

La dilucidación de ese papel depende en parte de la posibilidad de estudiar los capilares aisladamente. Algunos investigadores, valiéndose de métodos de captación por parte del cerebro en animales vivos, descubrieron que el paso de la glicina de la sangre al cerebro era notablemente limitado y concluyeron que el endotelio carecía de transportadores para la glicina. Sin embargo, cuando trabajábamos con capilares aislados descubrimos un sistema de transporte capaz de concentrar glicina en el interior de las células endoteliales. Estos dos descubrimientos, aparentemente contradictorios, se reconciliaron proponiendo una distribución asimétrica de los transportadores: el transportador para los aminoácidos neutros pequeños se encuentra en la membrana antiluminal, pero no en la luminal. En consecuencia, los aminoácidos neutros pequeños pueden extraerse del cerebro, pero no logran entrar en él.

La distribución asimétrica ayuda a mantener baja la concentración de glicina en el líquido que rodea las células del cerebro. En efecto, la concentración de glicina en el líquido cerebral suele ser más baja que en el endotelio, hecho de implicaciones importantes para los procesos de transporte. Cuando la glucosa y los aminoácidos grandes se acarrean de la sangre al cerebro, pasan de una región de alta concentración a otra donde su concentración es más baja. En ese movimiento "cuesta abajo", la energía necesaria para el transporte la proporciona el propio gradiente de concentración, y los transportadores simplemente facilitan la difusión; difusión que tendría lugar también sin su presencia, aunque más lentamente. Como es el caso de la glicina, para que un compuesto se traslade "cuesta arriba", de una región de baja concentración a otra de alta concentración, se requiere el aporte de energía. Para los aminoácidos neutros pequeños la energía procede de los iones de sodio. El movimiento de la glicina hacia dentro está acoplado con el movimiento del sodio, que fluye cuesta abajo hacia el interior del endotelio en virtud de su propio gradiente de concentración, favorable, y arrastra a la glicina consigo.

Por supuesto, una vez los aminoácidos neutros pequeños están dentro de la célula endotelial deben disponer de una vía de salida, pues de lo contrario su concentración aumentaría hasta alcanzar niveles insostenibles. La solución del problema la proporcionan probablemente los mismos transportadores que sirven para los aminoácidos neutros grandes. Las moléculas pequeñas tienen afinidad por los transportadores de las grandes. Aunque la afinidad no es tan fuerte como la de los ami-

noácidos neutros grandes por su propio transportador, es suficientemente intensa para permitir que las moléculas pequeñas abandonen la célula.

Otras asimetrías

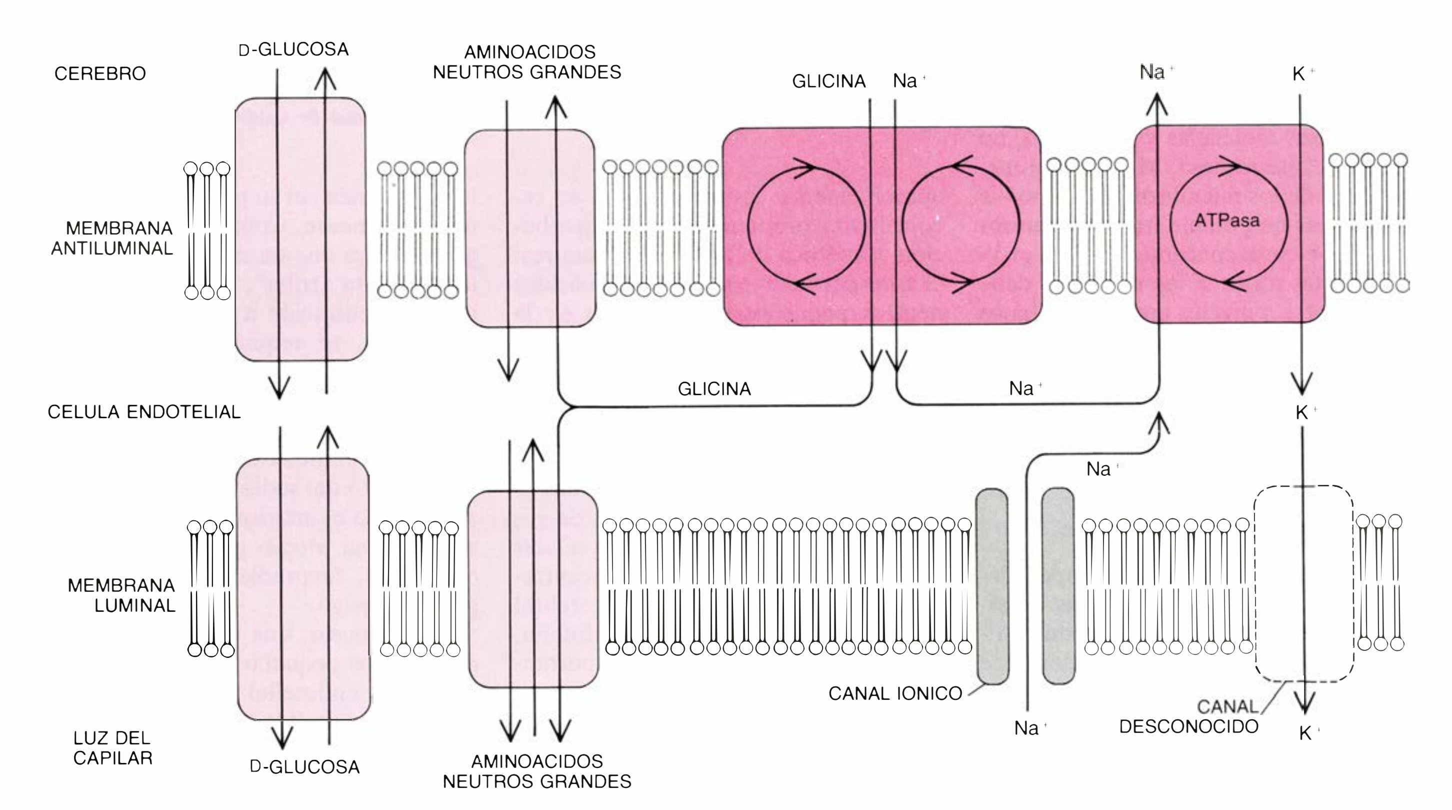
Dado que la noción de una distribución asimétrica de los transportadores había resultado tan provechosa en la interpretación de lo que sucedía con los aminoácidos neutros pequeños, la aplicamos también al estudio del transporte del potasio. Varias razones apuntaban que el movimiento de los aminoácidos neutros pequeños constituía un buen modelo del movimiento del potasio. Al igual que la glicina, el potasio ejerce un potente efecto sobre la transmisión de los impulsos nerviosos y se mantiene en concentraciones bajas en el líquido que rodea las células cerebrales. Otra semejanza es la relativa impermeabilidad de la membrana luminal del endotelio a los iones de potasio. Michael W. B. Bradbury, a la sazón en la Facultad de Medicina del Hospital St. Thomas de Londres, descubrió un ulterior punto en común: el potasio lo extrae del cerebro un sistema de transporte saturable.

Instados por la observación de Bradbury, logramos demostrar que en capilares aislados las células endoteliales pueden transportar potasio a su interior. Del mismo modo que sucede con el transporte de glicina, el transporte de potasio es "activo", en el sentido de que puede superar un gradiente de concentración. Sin embargo, como probamos en colaboración con J. Anthony Firth, entonces en el Hospital Clínico St. George de la Universidad de Londres, los mecanismos de esos dos tipos de transporte activo son diferentes. Nuestro trabajo con Firth demostró que la membrana antiluminal contiene una cantidad de la enzima ATPasa dependiente de sodio-potasio mayor que la que contiene la membrana luminal. Esa enzima constituye la base funcional de una bomba que, simultáneamente, transporta sodio fuera del endotelio y hacia dentro del cerebro y potasio fuera del cerebro y hacia el interior del endotelio.

Puesto que ambas funciones de la bomba deben realizarse en contra del gradiente de concentración reinante, el mecanismo consume una gran cantidad de energía. La molécula ATP (trifosfato de adenosina), muy rica en energía, suministra el combustible requerido. Escindiendo una molécula de ATP, la enzima de la bomba libera una cantidad de energía suficiente para extraer sodio de la célula mientras introduce potasio en ella. Naturalmente, el potasio que va acumulándose debe disponer de un medio de salida, que probablemente le proporcionen los poros localizados en la membrana luminal. Ese complejo sistema capacita al endotelio para mantener constante el nivel de potasio en el cerebro y desembarazarse del exceso; la clave reside en la distribución sumamente desproporcionada de la enzima de la bomba a uno y otro lado de la célula endotelial.

La barrera metabólica

Como sugieren con claridad los ejemplos expuestos, la barrera hematoencefálica se basa en buena parte en la regulación del transporte a través del endotelio. Con todo, no es ésa la única forma de evitar la entrada de un compuesto en el cerebro. Si una sustancia se introduce en las células endoteliales, en virtud de los procesos metabólicos puede convertirse en una forma química incapaz de atravesar la membrana antiluminal para alcanzar el cerebro. Quizá la demostración más sorprendente de ese mecanismo, denominado

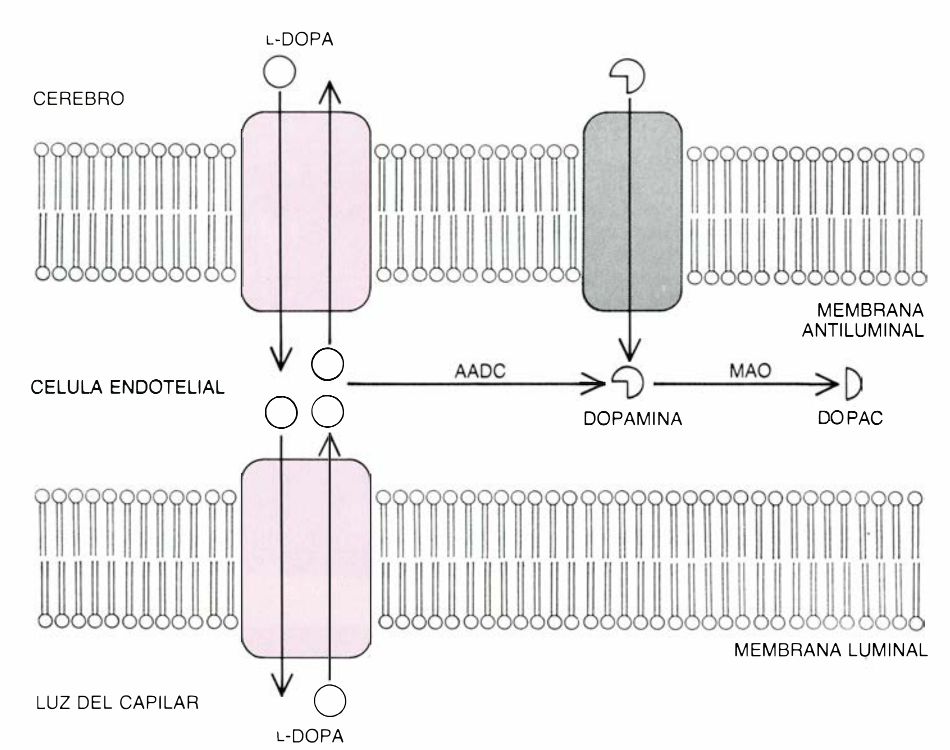


7. COMPLEJO SISTEMA DE TRANSPORTADORES que permite al capilar cerebral controlar el movimiento de entrada y salida de los tejidos. Algunos de los transportadores se limitan a facilitar la difusión osmótica (*color claro*); otros son mecanismos "activos" que necesitan una fuente de energía (*color oscuro*). La D-glucosa y los aminoácidos neutros grandes, como la fenilalanina, llegan al cerebro por medio de transportadores que se encuentran en ambas membranas de la célula endotelial. Esas sustancias fluyen al interior cerebral con la misma facilidad que lo abandonan. El potasio y los aminoácidos neutros pequeños, como la glicina, sólo se dirigen del cerebro hacia la sangre. Los bombean fuera del cerebro transportadores activos que se encuentran principalmente en la membrana antiluminal. El movimiento interno de la glicina está acoplado con el del sodio, que aporta la energía necesaria. La energía requerida para el transporte del potasio procede de la escisión de una molécula de ATP por parte de la enzima ATPasa; simultáneamente se bombea sodio hacia el interior del cerebro. La glicina puede abandonar el endotelio gracias al transportador para aminoácidos neutros grandes. El potasio lo abandona por un canal desconocido.

barrera hematoencefálica "metabólica", fue la proporcionada por A. Bertler, B. Falck, C. Owman y E. Rosengrenn, de la Universidad sueca de Lund. Descubrieron que la L-dopa, un aminoácido precursor de los neurotransmisores dopamina y noradrenalina, penetra en el endotelio con facilidad; sin embargo, una vez allí se modifica enzimáticamente y adquiere una forma incapaz de alcanzar el cerebro.

El descubrimiento de la barrera hematoencefálica metabólica y el conocimiento de la compleja red de transportadores que salpican la membrana plasmática han estimulado el estudio de las propiedades del endotelio. Recientemente, algunos investigadores han dedicado sus energías a encontrar el mecanismo por el cual el endotelio de los capilares del cerebro adquiere sus peculiares propiedades. Michael J. Wiley y Patricia A. Stewart, de la Universidad de Toronto, transplantaron tejido cerebral y muscular en embriones de ave. Al transplantar el tejido cerebral en el intestino, la microvascularización intestinal que crecía en el tejido cerebral transplantado adquiría las características propias de la barrera hematoencefálica. Cuando se transplantó tejido muscular en el cerebro, los microvasos cerebrales que crecían en el tejido intestinal perdieron sus características distintivas. Esos descubrimientos parecían demostrar que el desarrollo de la barrera hematoencefálica lo estimulan señales procedentes del tejido cerebral circundante, es decir, que no está programado genéticamente en algunas células endoteliales.

Los astrocitos constituyen candidatos verosímiles del origen de la señal de desarrollo, pero resulta muy difícil investigar la interacción entre los astrocitos y las células endoteliales en animales íntegros, o incluso en suspensiones de capilares aislados. Por esa razón, algunos investigadores de nuestro grupo, y de otros, han desarrollado métodos de cultivo de células endoteliales. Las células conservan las características de la barrera cuando se cultivan por primera vez, pero si se dividen y se traspasan a otras placas de cultivo pierden la configuración de la barrera. L. E. DeBault y P. A. Cancilla, de la Universidad de Iowa, descubrieron que si las células endoteliales de cerebro de ratón de un segundo cultivo se cultivaban de nuevo sobre una capa de células gliales, recuperaban sus propiedades de barrera. De ese modo supimos que las células gliales en cultivo presentaban el mismo efecto transformador o inductor que, según sospechábamos, ofrecían en vivo.



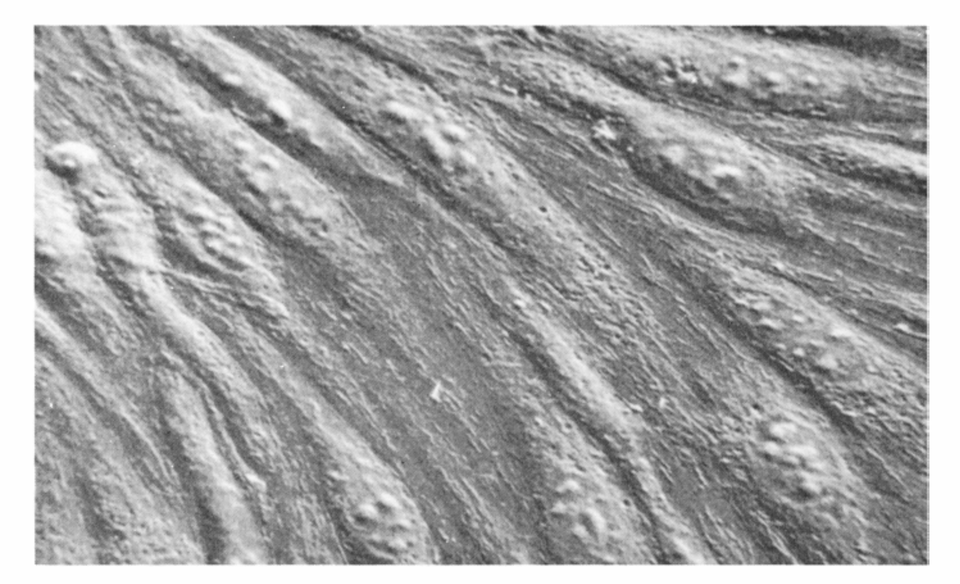
8. BARRERA HEMATOENCEFALICA "METABOLICA", formada por una serie de pasos enzimáticos que transcurren en el endotelio y por los cuales los compuestos se modifican y se les impide la entrada en el cerebro. La L-dopa, un aminoácido precursor de varios neurotransmisores, entra y sale del cerebro sirviéndose del transportador para los aminoácidos neutros grandes. No obstante, una vez en el interior del endotelio, puede transformarse sucesivamente en dopamina y DOPAC, por obra de las enzimas AADC y MAO. La dopamina puede abandonar el cerebro por su propio transportador, pero ni la dopamina ni la DOPAC son capaces de cruzar la membrana antiluminal hacia el interior del cerebro. De ese modo, las conversiones enzimáticas endoteliales actúan de mecanismo de control de la cantidad de L-dopa que alcanza el cerebro.

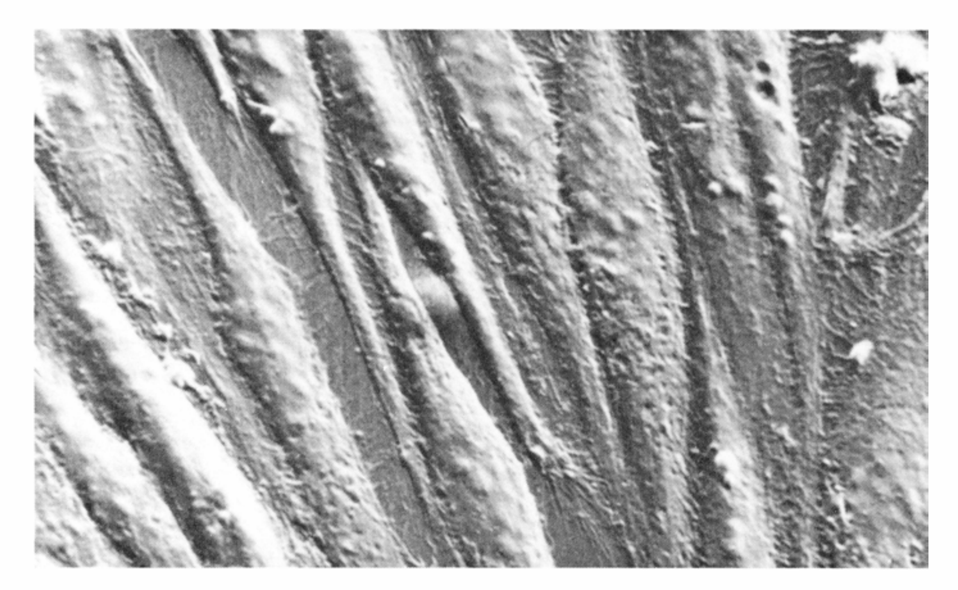
Se han utilizado las preparaciones de células endoteliales en cultivo para estudiar los orígenes de la barrera hematoencefálica, y también las funciones de dicha barrera cuando está completamente formada. Uno de los miembros de nuestro grupo de investigación, Phillip Bowman, ha desarrollado métodos de cultivo para las células endoteliales de los capilares cerebrales; actualmente empleamos esos métodos para observar los cambios de permeabilidad de la barrera. Gracias al trabajo de Bowman podemos preparar cultivos primarios de células endoteliales que sirven para demostrar algunas de las características esenciales de la barrera hematoencefálica: las células endoteliales contienen pocas vesículas de pinocitosis y con frecuencia las enlazan uniones estrechas. Cuando Katerina Dorovini-Zis se unió a nuestro grupo, tras disfrutar de una beca para trabajar con el equipo de Brightman, colaboró con Bowman para profundizar en la investigación.

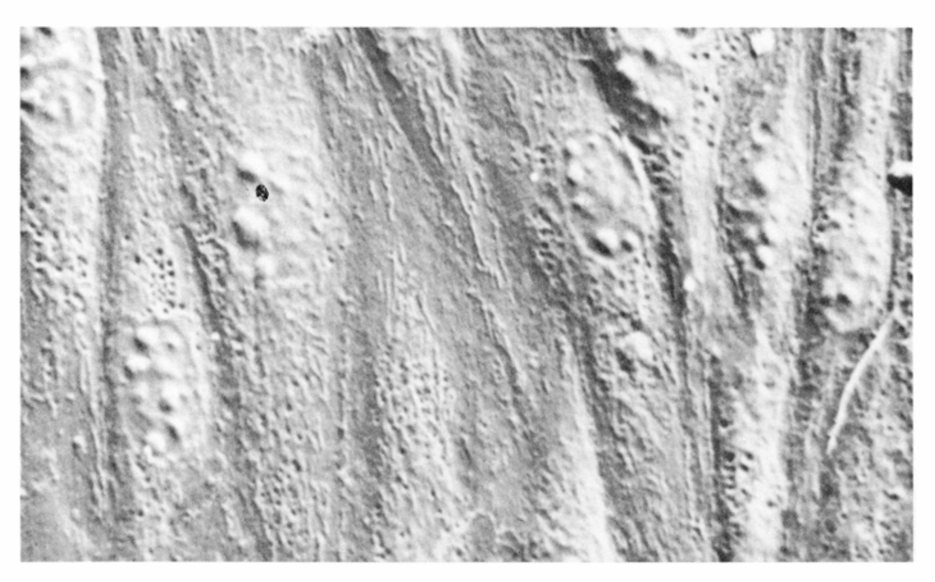
Cultivos de endotelio

Dorovini-Zis había estudiado un curioso fenómeno, investigado originalmente por Stanley I. Rapoport, del Instituto Nacional estadounidense de Gerontología. Rapoport descubrió que cuando se inyecta una solución hiperosmótica (muy concentrada) de azúcar en la arteria carótida (que irriga el cerebro) de un animal de experimentación, la permeabilidad de la barrera hematoencefálica aumenta considerablemente y con gran rapidez. La alteración es transitoria y muy pronto la barrera retorna a su estado original. Para explicar ese aumento pasajero de permeabilidad, Rapoport propuso que la solución concentrada de azúcar relajaba temporalmente las uniones estrechas entre células endoteliales.

En un trabajo realizado en el Instituto Nacional estadounidense de Enfermedades Neurológicas, de la Comunicación y Apoplejía, Dorovini-Zis demostró que la hipótesis de Rapoport era correcta. Descubrió la aparición de ciertos cambios morfológicos en los capilares tras la inyección de soluciones hiperosmóticas de azúcar en animales íntegros. Sus observaciones demostraron que las uniones estrechas entre las células endoteliales se separaban temporalmente después de la inyección de azúcar. Dorovini-Zis y Bowman realizaron una serie análoga de experimentos en nuestro laboratorio con células endoteliales en cultivo. En primer lugar demostraron que las células endo-







9. CELULAS ENDOTELIALES EN CULTIVO, que proporcionan un modelo del funcionamiento de la barrera hematoencefálica. Las imágenes muestran células endoteliales del cerebro de vaca. Al someterlas a un primer cultivo, las células forman una monocapa lisa (*arriba*). Si se transfieren a un medio sin calcio las células se separan y dejan entrever la placa de plástico subyacente (*centro*). Cuando se devuelven a un medio que contiene calcio, se restituye la monocapa (*abajo*). Esas reacciones imitan las que tienen lugar en la barrera hematoencefálica intacta. Hasta hace poco no se había logrado cultivar células endoteliales de los capilares cerebrales, pero Phillip Bowman y otros investigadores han desarrollado los métodos necesarios para conseguirlo; las células de las micrografías se cultivaron en el laboratorio de los autores con el método Bowman.

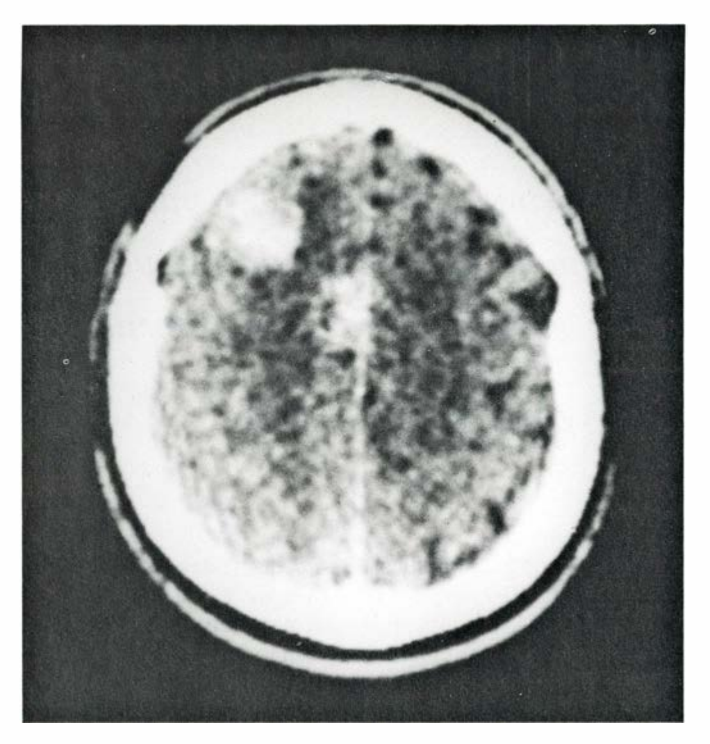
teliales cultivadas formaban una barrera funcional que impedía a la peroxidasa de rábano traspasar las uniones estrechas. Seguidamente comprobaron que, tras la exposición a altas concentraciones de azúcar, las uniones estrechas se separaban y permitían el paso del colorante; cuando se retiraba la solución de azúcar, la barrera hematoencefálica se restablecía.

Implicaciones médicas

El estudio de Dorovini-Zis y Bowman nos ha proporcionado un modelo de trabajo de la barrera hematoencefálica en placa de cultivo. En el futuro puede que ese modelo no sólo resulte útil para la ciencia básica, sino también por sus aplicaciones clínicas. Desde el punto de vista del clínico, el problema fundamental que presenta la barrera hematoencefálica es el de que la traspasen agentes terapéuticos dirigidos al cerebro para tratar enfermedades que afectan a ese tejido. Algunas drogas, como el antibiótico cloranfenicol, son muy liposolubles y entran en el cerebro fácilmente. Sin embargo, otras muchas, entre las que se cuentan algunas tan importantes como la penicilina, tienen muy poca solubilidad en lípidos y entran en el cerebro lentamente, si lo hacen. De hecho, la toxicidad de la penicilina es tan baja que puede administrarse a dosis extremadamente altas, y la elevada concentración del antibiótico en sangre ayuda a compensar su escasa liposolubilidad.

Por desgracia, pocas medicinas son tan relativamente inocuas como la penicilina. La mayoría de los compuestos curativos presentan, al menos, algunos efectos secundarios indeseables y por ello no pueden administrarse en grandes cantidades a la espera de que una parte de la dosis alcance su objetivo. La administración eficaz de medicamentos al cerebro suele basarse en la disminución temporal de la barrera hematoencefálica, lo que permite el paso del fármaco, o se funda en la evitación de dicha barrera.

Un modo de llevar a cabo la primera estrategia se apoya en el descubrimiento de Rapoport de que la permeabilidad de la barrera aumenta considerablemente al inyectar en la arteria carótida una solución hiperosmótica de azúcar. Aunque el trabajo de Rapoport se realizó en animales, la transitoriedad del incremento de permeabilidad observado suscita la esperanza de que al inyectar soluciones hiperosmóticas en pacientes humanos se logre dirigir agentes terapeúticos al cerebro. Re-




10. APERTURA DE LA BARRERA por infusión de una solución de azúcar altamente concentrada en la arteria carótida de un enfermo con un tumor cerebral. La solución provoca el relajamiento de las uniones estrechas entre células endoteliales. Las dos imágenes se obtuvieron por tomografía computarizada (TC) del cerebro visto desde arriba; la frente cae en la parte superior. La inyección de un reactivo en el cerebro hace que las zonas donde la barrera está intacta aparezcan oscuras y, las regiones con aumento de permeabilidad, claras. La imagen de la izquierda muestra el cerebro antes de la infusión; las zonas más claras de la parte superior izquierda son tumores, donde la barrera está algo abierta. La imagen de la derecha, realizada 30 minutos después de la infusión, muestra el espectacular aumento de la permeabilidad que provoca la solución de azúcar en el tumor y el tejido circundante. La apertura "hiperosmótica" de la barrera se utiliza para administrar agentes quimioterápicos al cerebro. Las imágenes fueron obtenidas por Edward A. Neuwelt, de la Universidad de Oregon.

cientemente, Edward A. Newelt, de la Universidad de Ciencias de la Salud de Oregon, ha aplicado los descubrimientos de Rapoport a seres humanos. En primer lugar, Neuwelt demostró que en pacientes con tumores cerebrales puede abrirse la barrera administrando soluciones de azúcar muy concentradas; su trabajo más reciente sugiere que las drogas administradas de ese modo pueden contribuir a la regresión o desaparición del tumor.

La segunda estrategia general, evitar la barrera, puede llevarse a cabo por medio de ciertas técnicas directas y ensayadas clínicamente o por algunos métodos más elegantes que todavía están en fase experimental. La manera más directa de evitar la barrera consiste en inyectar la sustancia terapéutica en el líquido cefalorraquídeo. Se ha empleado durante mucho tiempo ese método en el tratamiento de tumores cerebrales. La inyección directa tiene la ventaja de llevar el fármaco al lugar donde se necesita; mas, para reducir el número de inyecciones, a menudo se suministra una gran cantidad de la droga, lo cual puede provocar efectos colaterales perjudiciales debido a la toxicidad de muchos de los agentes quimioterápicos.

Un método mucho más elegante (aunque hasta ahora no probado a fondo) podría basarse en la permeabilidad selectiva de la barrera hematoencefálica en combinación con las propiedades metabólicas del cerebro. De diseñarse una droga que entrara rápidamente en el cerebro y, una vez allí, se modificara de forma tal que fuera incapaz de cruzar la barrera, la absorberían los tejidos del cerebro y ejercería un efecto local mantenido. Este principio, que parece prometedor como aproximación experimental, encuentra un paralelo en la naturaleza en la diferencia que distingue la heroína de la morfina.

Drogas

Las estructuras químicas de la heroína y la morfina son bastante parecidas. Su única diferencia reside en que la molécula de heroína presenta dos grupos acetilo (CH_3CO) en las posiciones donde la morfina posee grupos hidroxilo (OH). Las propiedades químicas de los grupos acetilo confieren a la heroína una notable liposolubilidad; por el contrario, la liposolubilidad de la morfina es muy baja. En virtud de esa diferencia química, la heroína penetra en el cerebro con mucha más facilidad que la morfina. (Esa puede ser una de las razones por las que suele abusarse más de la heroína que de la morfina, a pesar de que ambas sustancias ejercen potentes efectos sobre la función cerebral.) Sin embargo, cuando la heroína ya se encuentra en el cerebro, las enzimas de que dispone ese órgano retiran los grupos acetilo y la convierten en morfina, atrapándola en los tejidos cerebrales. Una droga terapéutica elaborada para aprovecharse de ese mecanismo podría administrarse a dosis controladas sin menoscabo de que ejerciera un potente efecto.

Todos esos principios sugieren que los recientes avances en el conocimiento de la barrera hematoencefálica encontrarán importantes aplicaciones clínicas en los años próximos. No obstante, quizás el máximo valor del trabajo realizado desde 1970 no radique en su significado práctico, sino en la satisfacción que proporciona el conocimiento de un fenómeno biológico fundamental. Lo que nos caracteriza como humanos puede, en gran parte, localizarse en un único órgano: el cerebro. La información recabada en los últimos años sobre la barrera hematoencefálica ha supuesto un considerable avance en nuestro conocimiento sobre la forma en que una regulación muy estrecha de las condiciones fisiológicas especiales que requiere el cerebro permite que éste lleve a cabo el extraordinario trabajo que tiene encomendado.

Los colores de las cosas

Ilusiones cromáticas, representadas (por primera vez) en la pantalla de un ordenador, prueban que el color no se percibe solamente por la visión de la luz dimanante de las superficies de una escena

Philippe Brou, Thomas R. Sciascia, Lynette Linden y Jerome Y. Lettvin

El color, como la belleza, depende del ojo con que se mira. Es una experiencia subjetiva y, como cualquier otra, no susceptible de ser medida. Existe, sin embargo, una opinión generalizada de que el color, a diferencia de la belleza, viene determinado por causas físicas: el espectro de la luz que llega al ojo. Este se asemeja a una cámara de televisión en color, que mide cuánta energía hay en las longitudes de onda largas (rojo), en las longitudes de onda medias (verde) y en las cortas (azul) de la luz en cada uno de los puntos de una imagen. Al igual que la cámara, el ojo tiene tres tipos de sensores del color, por lo que se considera que en cualquier punto éste se percibe por la visión de lo rojo, lo azul y lo verde que se presenta en dicho punto.

Esta creencia general constituye el impulso para muchas de las ilusiones cromáticas concebidas por investigadores dedicados al estudio de la percepción visual. La noción subyacente en tales composiciones es la de que debería verse determinado color, aunque de hecho se distingue otro. Suele recurrirse a las "ilusiones" para mostrar la falibilidad de los sentidos: para demostrar que el ojo no funciona como debiera. Según otro enfoque, las nociones al uso sobre nuestra visión del color serán totalmente erróneas, si se violan con tanta facilidad y pertinacia. Las "ilusiones" no revelan defectos. Arrojan luz sobre el diseño no convencional de la visión cromática.

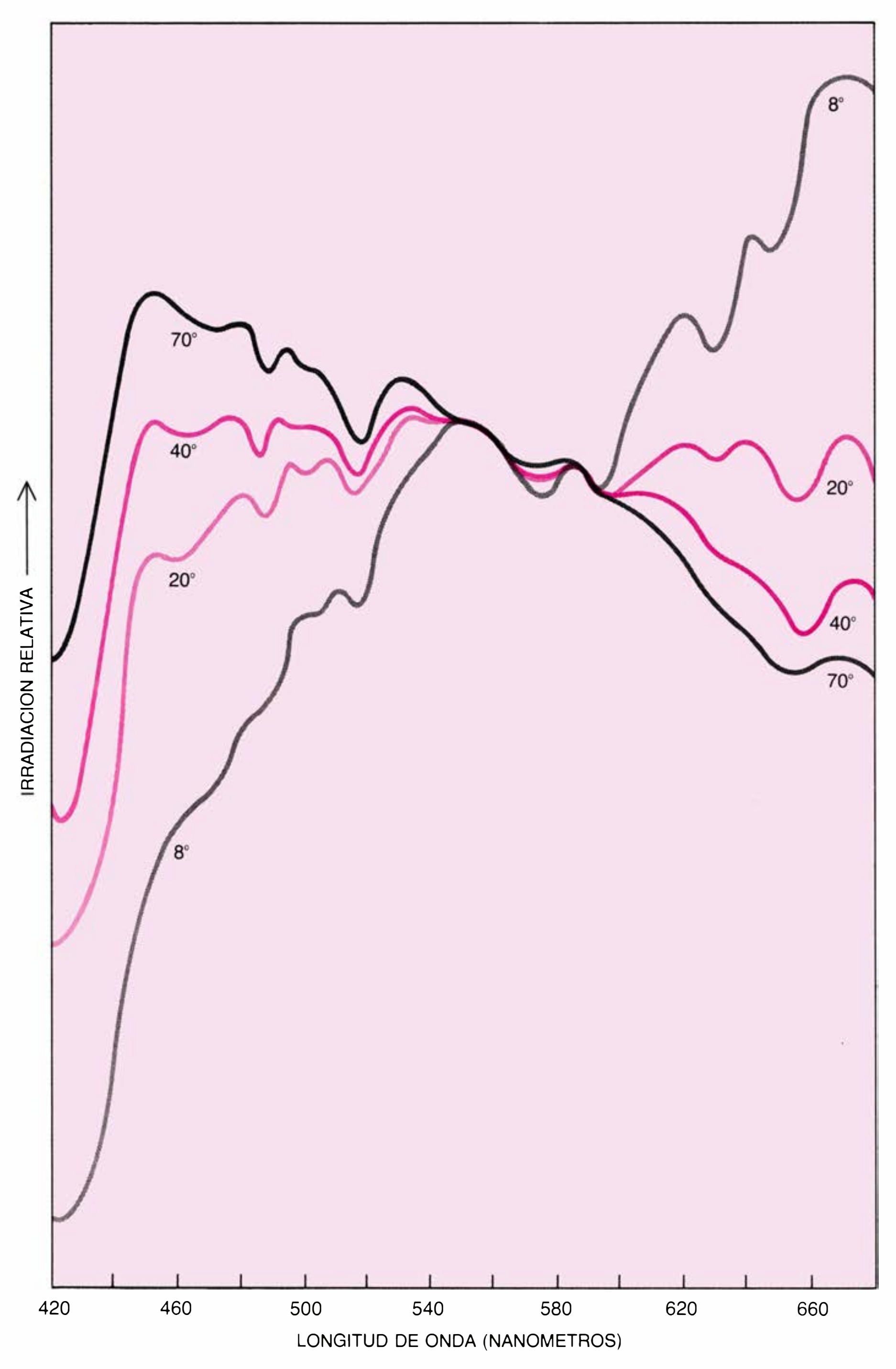
La noción no convencional que propondremos en este trabajo –y que someteremos a prueba por medio de una serie de ilustraciones– es la siguiente: los colores que percibimos no dependen exclusivamente de la luz dimanante de cada objeto, independientemente percibida del resto de objetos existentes en el mundo, sino de la comparación de las luces dimanantes de un objeto con las de su entorno. Esta afirmación parece un tanto misteriosa. Después de todo, los colores de los objetos se perciben como una propiedad intrínseca de sus superficies. Una rosa roja vista a la luz del día parece absolutamente roja, no roja en relación a lo que la rodea. Pero esta percepción de la rojez intrínseca no significa que la cualidad de rojo la produzcan solo los datos sensoriales presentes en la imagen de la rosa. Aquí no pretendemos explicar cómo entiende la percepción el observador, sino el proceso aplicado a los datos sensoriales para que la percepción sea posible.

La clave de que algo falla en las nociones convencionales relativas a los colores de las cosas es, en efecto, una "ilusión cromática": la "ilusión" más universal, y tan arraigada en nuestra experiencia diaria que ni siquiera la advertimos. Nos referimos a la constancia cromática de los objetos vistos a la luz del día. La iluminación exterior no es fija; cambia en intensidad, desde el amanecer hasta el mediodía y el crepúsculo, y cambia en su espectro. Al amanecer, la luz es rosácea y por la tarde se torna amarilla. La luz septentrional preferida por los artistas es la del azul del cielo, cuando se excluye el sol. La luz difusa que se percibe bajo un árbol frondoso parece bastante verde. Por contra, bajo los diversos tonos de la luz del día una hoja de papel blanco siempre se ve del color que es, blanca. De hecho, todas las superficies que uno distingue en el exterior o al aire libre permanecen cromáticamente constantes, con independencia de la variación que sufra la luz diurna.

Los manuales sobre visión dedican a la constancia cromática, en el caso de que merezca su atención, una escueta y escéptica nota a pie de página. Tal escepticismo no es difícil de entender. Dado que muchos de nosotros pasamos nuestra vida bajo luz artificial, nos hemos acostumbrado a que caras y cosméticos, por ejemplo, cambien de color al pasar del alumbrado incandescente al fluorescente o viceversa. Pero no hay razón para semejante displicencia. Los investigadores de ya hace un siglo sabían que la constancia cromática presentaba un serio problema a la hora de explicar la percepción. La constancia cromática es tan fiel que uno tiende automáticamente a comparar de memoria el color del rostro y de los labios de alguien que ahora se halla ante una luz diurna con los colores vistos hace una hora, un día o una semana, y bajo otro tipo de luz, detectando así cambios debidos a enrojecimiento o palidez, o incluso los significativos de enfermedades como ictericia (que vuelve la piel amarilla) o anoxia (que la vuelve azul). Tales cambios son mucho menores que los posibles en la luz del día. Es como si, repitiendo lo dicho por el fisiólogo Hermann von Helmholtz el siglo pasado, "descartáramos el iluminante" cuando percibimos el color.

1. LAS SOMBRAS DE COLOR constituyen una "ilusión" que ilumina los trabajos no convencionales de la percepción cromática. El busto del explorador y científico del siglo XIX Alexander von Humboldt se ha colocado en ambas fotografías ante un fondo blanco. El busto se ilumina desde un lado con un haz de luz blanca y desde el otro con un haz de luz de color. El busto se coloca frente al haz de color; de aquí que la sombra del área de la nuca sólo contenga luz blanca. Sin embargo, no parece incolora: presenta el color complementario a la sombra de color del lado opuesto. Así, la sombra del área de la parte posterior de la cabeza, en la imagen superior, parece más "cálida" que la sombra correspondiente en la fotografía inferior. Si se enmascara el entorno de las sombras se verá que las sombras son virtualmente idénticas. La "ilusión" óptica indica que la percepción del color descansa en comparaciones a través de las líneas de demarcación de una imagen.

Helmholtz suponía que nosotros sabemos, por memoria o deseo, los colores que esperamos ver y ajustamos convenientemente nuestra percepción para descartar la iluminación. Pero no se sentía cómodo con esta idea, y con razón. Se requiere un milagro, dado que uno no puede afirmar, por medio de cualquier órgano sensorial imaginable, qué luz se difunde sobre cualquier cosa, salvo sobre el órgano en cuestión. Dicho de otro modo, no podemos asegurar qué luz ilumina una superficie; el observador sólo recibe una parte de esa luz: la parte que la superficie refleja en su ojo. ¿Cómo puede, entonces, "descartarse el iluminante"?



2. VARIEDADES DE LUZ DIURNA: difieren notablemente entre sí en sus propiedades físicas, en particular en lo relativo a su espectro. Los colores de los objetos percibidos a la luz del día presentan, sin embargo, una destacada constancia a pesar del cambio en iluminación. Este fenómeno se denomina constancia cromática. Las cuatro curvas ilustran el espectro de la iluminación difusa a nivel del suelo cuatro veces al día, cuando el sol se halla a diversas distancias angulares entre el horizonte (0 grados) y el cenit (90 grados). Se midió la curva del sol a 8 grados, media hora aproximadamente antes de su ocaso. En el espectro de luz diurna difusa la cresta se produce entonces a aproximadamente 660 nanómetros, muy dentro de la parte roja del espectro. Horas antes, cuando el sol se halla alto en el firmamento, a 70 grados, la cresta se encuentra comprendida en longitudes de onda unos 200 nanómetros más cortas, muy dentro de la zona azul del espectro. Los cuatro espectros fueron publicados por S. T. Henderson. La recreación ha sido realizada por A. Christie.

En nuestra pretensión de responder a esta pregunta no podemos soslayar una dificultad que se interpone cuando se trata del color. En realidad hay dos tipos diferentes de explicación de la visión cromática. El primero expone cómo la información procedente de una imagen visual se convierte en datos sensoriales. Es decir, la explicación se preocupa de cómo los conos, los sensores de color del ojo, reaccionan ante la luz. En cada cono, la llegada de la luz baña un pigmento sensible a la misma; así, la explicación trata de las tasas con que se producen esos "baños" de pigmento causados por la llegada de fotones, o partículas de luz.

Los análisis experimentales que revelan las leyes de esta traducción comienzan con Newton. La estrategia consiste en hacer que los seres humanos actúen como lo que se ha dado en llamar dispositivos nulos de medida. Los sujetos ajustan una luz de referencia (verbigracia, acomodan el brillo de tres luces de color que se combinan para formar una mancha de luz) hasta que desaparezca la línea que separa la referencia de una luz de prueba adyacente y no se pueda ya distinguir una de la otra. Los experimentos han permitido establecer que ciertas luces bañan los pigmentos de forma idéntica. En otras palabras, los experimentos sólo sirven para describir las respuestas pigmentarias. No dependen de lo que le pueda ocurrir a los datos sensoriales, una vez producidos por los conos.

El segundo tipo de explicación es muy distinto. No entra en el campo de las magnitudes mensurables tales como el brillo de las luces de prueba. Se ocupa de la percepción del color. Todo lo que se sabe acerca del aparato del ojo, y todo lo inferido sobre el cerebro partiendo de la fisiología y la psicología, muestra que el observador no es consciente directamente de los datos sensoriales en bruto, sino solamente de las consecuencias de un proceso aplicado a los datos. La estrategia apropiada para elaborar una explicación sobre la percepción del color consistirá, por tanto, en tomar las leyes para la adquisición de datos como supuestas (el primer tipo de teoría ya se refiere a este punto) y buscar las reglas para el tratamiento de los datos.

Creemos que tal búsqueda se facilitaría si adoptáramos la actitud del in-

geniero, a quien no le importa tanto el análisis del mundo cuanto el diseño de un sistema que cumpla una finalidad específica. (El ingeniero siempre "construye con arreglo a especificaciones".) Se trata de imaginar la finalidad de la visión del color y diseñar después un sistema para su realización.

En tanto que facultad útil, la visión del color evolucionó en un mundo primario en el que la luz solar –dispersa, refractada y reflejada– era el principal elemento iluminante. Los objetos que iluminaba eran en su mayoría sólidos, opacos y no metálicos, que reflejaban la luz de acuerdo con su composición material y las asperezas, irregularidades y sinuosidad de sus superficies. Los objetos se distribuían, sin mayor dependencia, sobre la tierra. Cualquier imagen de un mundo semejante es un mapa bidimensional de un caos determinado: una región limitada en la imagen confina casi siempre con otras muchas regiones; el cambio de luz a través de uno de los segmentos de una frontera sirve de poco para predecir el cambio a través de cualquier otro segmento. Resumiendo, tres condiciones –luz diurna, reflectancias varias y cierta diversidad en su disposición– constituyen las limitaciones restrictivas bajo las que evolucionó la visión del color.

Imaginemos que el color se desarrolla como elemento auxiliar de la visión. La visión cromática mejora la capacidad para distinguir las superficies de forma memorizable, y así los alimentos, amenazas, etcétera, puedan llegar a conocerse y reconocerse con seguridad. Dado que la visión policromática permite muchos matices más que la visión monocromática en blanco y negro, resulta evidente que la visión en color presenta ventajas. No obstante, ciertos matices o distinciones no fiables no son de ninguna utilidad; en realidad constituyen un inconveniente. Señales sin significado equivalen a ruido. Esto acentúa el valor de la constancia cromática. La capacidad para reconocer cosas disminuiría si su color se modificara por un cambio de iluminación.

Hablando del color, ¿qué es, pues, lo que servirá de cualidad memorizable de una superficie, cualidad que sea a la vez intrínseca de la superficie e independiente de la circunstancia accidental de la forma de luz solar que incida sobre dicha superficie? La única cualidad que satisface estas condiciones es la reflectancia: capacidad de la superficie para reflejar la luz de cada longitud de onda determinada. Si atendemos a la definición habitual, la reflectancia no puede conocerse. Es la relación entre la luz incidente en una superficie y la luz reflejada por dicha superficie. Como Helmholtz ya sabía muy a pesar suyo, el ojo sólo tiene acceso a la última. De aquí que parezca absurdo pretender recurrir a las reflectancias para fundamentar la visión cromática. Sin embargo, es absurdo solamente si uno acepta por dogma que el color de una superficie depende de la luz dimanante únicamente de dicha superficie.

Existen otras técnicas posibles. La más simple substituye las mediciones de la luz reflejada por distintas superficies con comparaciones de las luces reflejadas por pares de superficies adyacentes. Si las superficies se hallan bajo la misma iluminación, la comparación es independiente de la luz incidente. Como resultado, la comparación de las luces reflejadas equivale a cotejar las reflectancias (que por sí solas son imposibles de conocer). Así pues, hemos llegado a la hipótesis de que el color percibido es una cualidad de la reflectancia de una superficie comparada con las reflectancias de otras superficies. Esta es una idea que puede ponerse a prueba; sugiere, por ejemplo, que la percepción de un color estable en un punto determinado de una imagen requiere que las regiones próximas al punto varíen suficientemente. Es ésta una idea que examinaremos valiéndonos de una serie de "ilusiones" cromáticas, que hemos dispuesto siguiendo las composiciones ideadas por Edwin H. Land, fundador de la Polaroid Corporation, y experto en el estudio de la visión en color.

En esta época de los ordenadores personales, con pantallas de representación cromática, la manipulación del color es tarea fácil; las "ilusiones" que veremos pueden provocarse en cualquier pantalla de televisión. Las composiciones que aquí aparecen fueron fotografiadas (en el Instituto de Tecnología de Massachussets) por Bradford Howland y Denise D. Denton, quienes emplearon cámaras y películas ordinarias. Las únicas dificultades encontradas se debieron a que las fotografías, publicadas en la revista, tienen que someterse al proceso de su impresión.

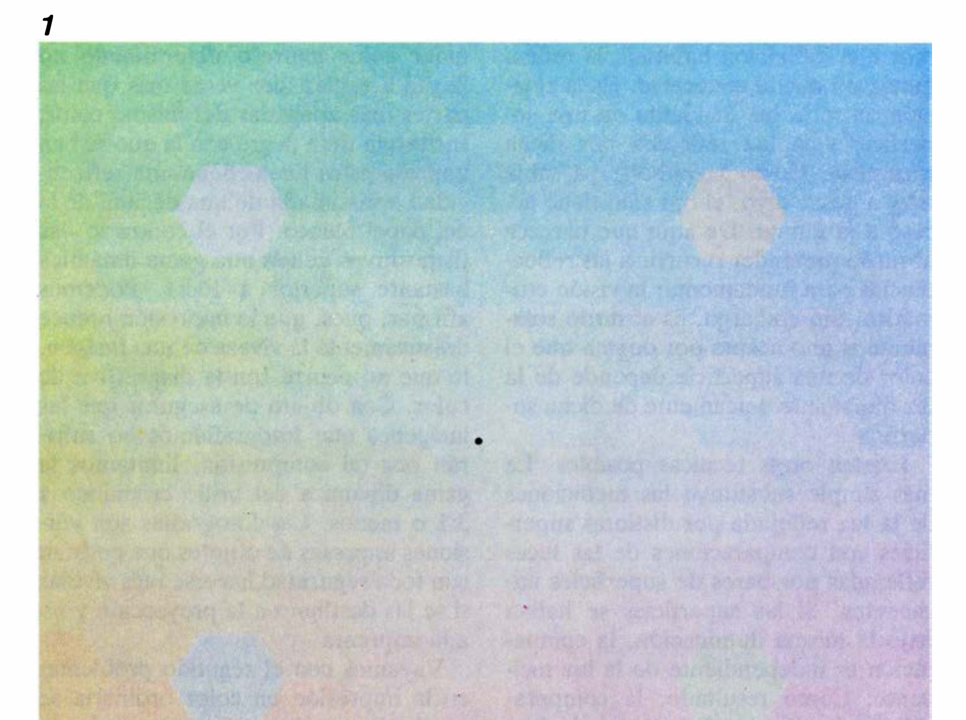
Surgieron dos problemas. El primero tenía que ver con la impresión en color, que presenta una gama dinámica menor de 10:1 a lo largo del espectro. Es decir, las partes más brillantes de cualquier color impreso determinado no llegan a brillar diez veces más que las partes más apagadas del mismo color. Incluso la tinta negra con la que se han impreso estas líneas tiene una reflectividad aproximada de una décima de la del papel blanco. Por el contrario, las diapositivas tienen una gama dinámica bastante superior a 100:1. Podemos afirmar, pues, que la impresión reduce drásticamente la viveza de una imagen, lo que no ocurre con la diapositiva de color. Con objeto de asegurar que las imágenes que fotografiamos no sufrirán por tal compresión, limitamos la gama dinámica del brillo cromático a 3:1 o menos. Las fotografías son versiones impresas de objetos que podrían con toda seguridad hacerse más vívidas si se las destinara a la proyección y no a la imprenta.

Vayamos con el segundo problema: en la impresión en color ordinaria se emplean tres tintas (magenta, cian y amarillo), notablemente diferentes en su cromatismo del rojo, azul y verde propios de los fluorescentes de las pantallas de ordenador. En consecuencia, la imprenta no puede producir verdes del mismo brillo y saturación que los que ofrece la pantalla de un ordenador, ni siquiera dentro de la gama dinámica que hemos elegido. (Para obtener verdes intensos en anuncios impresos, los fabricantes de cigarrillos mentolados han de sufragar los gastos de una tinta adicional, la verde, empleada en imprenta.) En la construcción de las figuras se tuvieron en cuenta estas limitaciones.

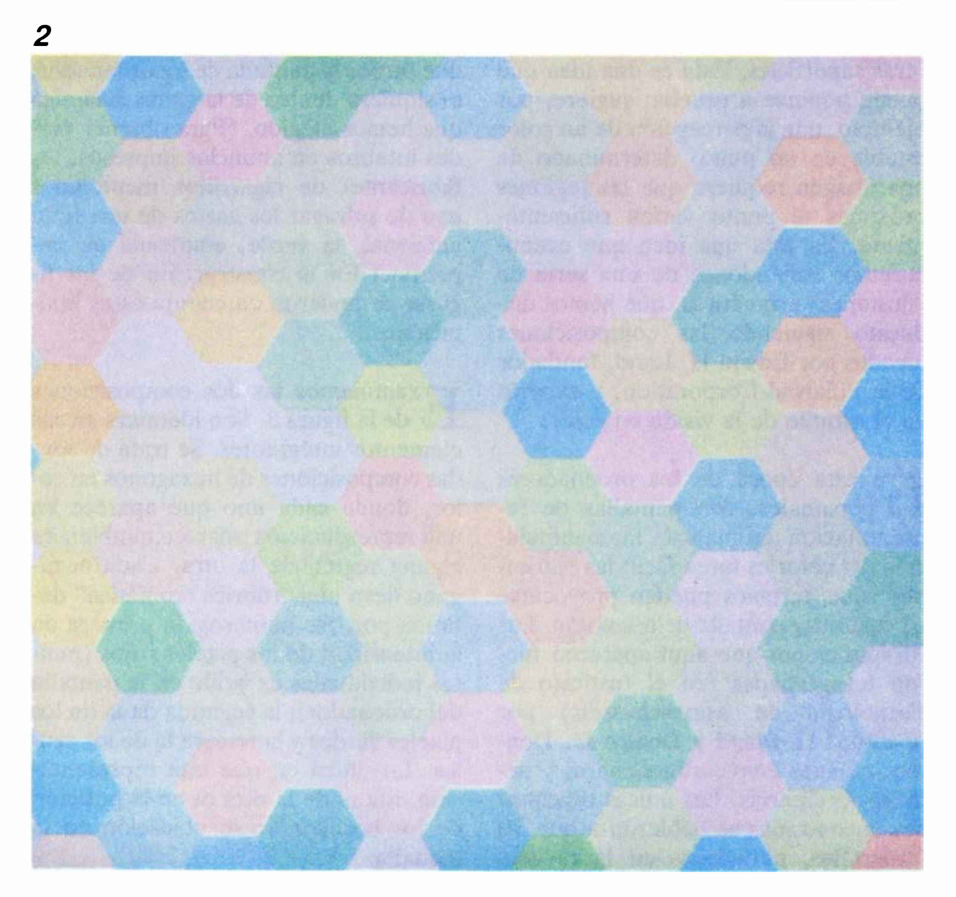
Examinemos las dos composiciones de la figura 3. Son idénticas en sus elementos integrantes. Se trata de sendas composiciones de hexágonos en color, donde cada uno que aparece en una representación aparece también en alguna región de la otra. Cada hexágono lleva una "rúbrica cromática" definida por tres números; la primera da la intensidad de los pixeles rojos (puntos individuales de brillo en la pantalla del ordenador); la segunda da la de los pixeles verdes y la tercera la de los azules. Lo único en que una representación difiere de la otra es en la posición de los hexágonos: su ubicación en la pantalla.

En la primera composición los hexágonos se ordenan con arreglo a sus elementos integrantes. El rojo aumenta en intensidad de arriba abajo en la composición; el verde lo hace de abajo arriba y el azul de izquierda a de-

1



2



3. "ILUSIONES" producidas por un conjunto de hexágonos de color, fotografiadas en un ordenador. Los hexágonos de la primera composición aparecen también en la segunda. No obstante, en la primera los hexágonos se ordenan cromáticamente, mientras que en la segunda se distribuyen al azar. Esta distribución aleatoria permite que la gama de colores parezca más definida. Cinco hexágonos presentan la misma cromaticidad y mantienen su posición en ambas creaciones. En la primera composición, parece que sus colores son un tanto diferentes; en la segunda, el color (un gris neutro) puede reconocerse como el mismo en los cinco.

recha. La intensidad gradual de un hexágono con respecto al inmediato se ha dispuesto para que sea algo más fuerte que meramente visible. La segunda composición es una imagen totalmente diferente. La gama de colores parece más amplia y de mayor viveza. Y sin embargo, la única diferencia estriba en que los hexágonos de color se han revuelto: se han distribuido de una manera aleatoria, no ordenada.

Vale la pena intentar indicar el cambio en la posición de un hexágono de un color determinado de una composición en la otra. En el caso de un hexágono situado en el límite de la primera composición, la nueva posición en la segunda, aleatoriamente determinada, es bastante fácil de hallar. Pero dudamos que los ojos del observador sean de gran ayuda para descubrir la mayoría de las nuevas posiciones, a menos que cada hexágono se aísle o salvaguarde de los otros.

En cada composición hay cinco hexágonos especiales por dos razones. En primer lugar, sus ubicaciones respectivas son constantes. En ambas composiciones éstas son la del hexágono central y las de cuatro hexágonos más, situado cada uno de ellos cerca de cada esquina de la composición. En segundo lugar, los cinco hexágonos son idénticos en su rúbrica cromática. Los restantes difieren todos en su triplo de números característico.

Inténtese comparar los cinco hexágonos. En la primera composición deberán aparentar ser de colores diferentes, a pesar de la estrecha gama cromática de la ilustración. (El efecto sería más potente si pudiéramos aumentar la gama dinámica.) Pero si a la distancia normal de lectura (unos 40 centímetros) el observador fija su mirada sobre cualquiera de ellos, éstos deberán volverse de un color indefinido.

No es probable que el lector logre identificar el hexágono del centro. Se ha marcado con un punto en su centro. Si se fija la mirada en el punto (cerrando un ojo), los colores de los cuatro hexágonos circundantes deberán parecer fuertes al principio, aunque a los pocos segundos los hexágonos deberán desvanecerse. En realidad, toda la representación deberá parecer bastante difusa, excepto en su perímetro: la línea de demarcación con el blanco de la página.

La segunda composición vuelve a ser totalmente diferente. Los cinco hexágonos deberán parecer uniformemente grises, a pesar de que ocupan las mis-

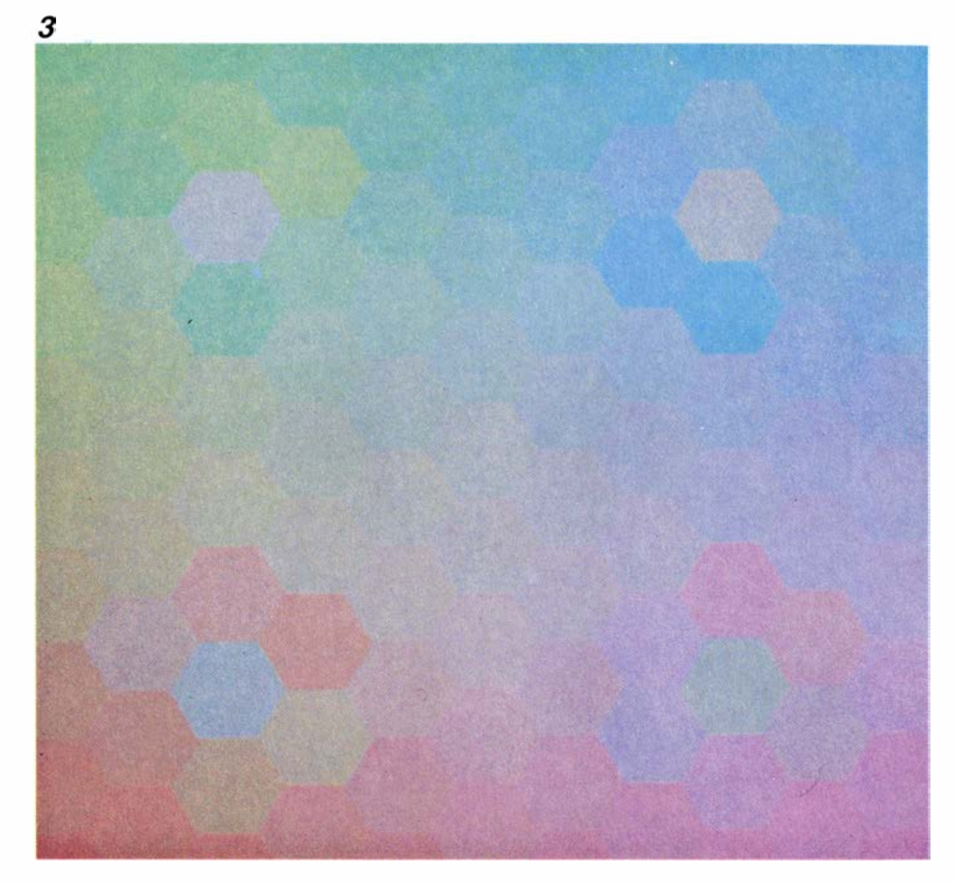
mas posiciones y tienen la misma rúbrica cromática que poseían en la primera composición. Si el lector fija su mirada en uno cualquiera de los cinco, observará que su color continúa siendo gris. Además, si se fija la mirada en el punto central, ello no deberá conllevar un deterioro general de la imagen, como sucedió en la primera representación.

Los resultados de estas exploraciones se resumen fácilmente. La distribución estocástica de los hexágonos de color que rodean los cinco hexágonos grises da lugar, por alguna razón, a una percepción más viva del color y al mismo tiempo estabiliza los hexágonos grises. Por el contrario, la distribución ordenada de los hexágonos apaga la intensidad de sus colores haciendo que el color de los hexágonos grises se disperse: elimina su constancia cromática.

En la tercera composición [*figura 4*] hemos modificado el guión de la primera composición sólo en la proximidad inmediata de los cuatro hexágonos grises de la periferia. En particular, el anillo de hexágonos se ha reordenado alrededor de cada hexágono gris: los hexágonos que limitan con un hexágono gris en la primera representación continúan haciéndolo en la tercera, aunque su orden anular se ha modificado. Los promedios de intensidad de los pixeles rojos, verdes y azules que ciñen un hexágono gris continúan, por tanto, como eran. Por su parte, los hexágonos grises no han cambiado mucho en su color.

La cuarta composición [*figura 5*] es aún más fidedigna al esquema de la primera. Cuatro hexágonos exteriores, que se unen a los cuatro hexágonos grises, se han cambiado diagonalmente. El resto continúa inalterado; pero ahora los hexágonos grises ya no difieren mucho en su color.

En la quinta y sexta composición [*figura 6*], los fenómenos continúan fundamentalmente siendo como eran en la primera y segunda composición. La diferencia resulta de que el programa del ordenador que genera las imágenes se ha modificado de forma que las rúbricas cromáticas se especifican en función del magenta, cian y amarillo, pigmentos empleados en la impresión en color. (La pantalla del ordenador prosigue resplandeciendo en sus acostumbrados rojo, azul y verde, aunque la proporción de estos "resplandores" se ha ajustado para que simulen las tintas de imprenta.) Las "ilusiones" cromáticas continúan siendo válidas, si bien, y



4. LA REORDENACION DEL ANILLO de los hexágonos de color que ciñen a cada uno de los hexágonos grises no contribuye gran cosa a la abolición de sus colores inestables y determina que parezcan firmemente grises. La redistribución de los anillos constituye el único cambio introducido con respecto a la primera composición; el resto de los hexágonos retiene su orden cromático. La representación sugiere, por consiguiente, que la percepción del color se basa principalmente en comparaciones locales, realizadas en la retina, de las reflectividades a través de las líneas de demarcación entre manchas de color en una imagen visual.

como cabe esperar, los colores observados difieren de los de la primera composición.

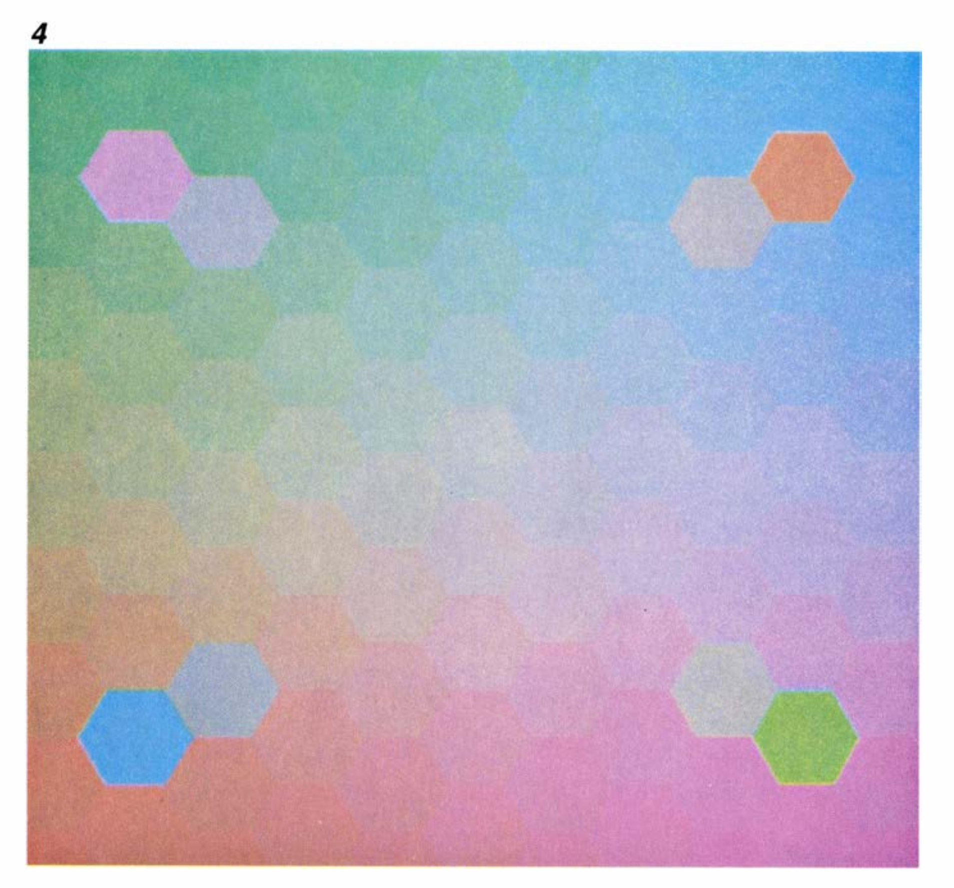
Nos queda otra "ilusión" más por mostrar. A la constancia cromática se oponen las llamadas sombras de color. Su forma más común puede verse en la figura 1, donde presentamos dos fotografías de una escena real: el busto del científico Alexander von Humboldt colocado delante de un fondo blanco. En cada una de las fotografías el busto se ilumina, desde un lado, por medio de una luz de color y, desde el otro lado, con una luz blanca. Resulta difícil adivinar de qué luz se trata en uno y otro caso.

En cada fotografía, una de las sombras tiene el color del haz de color. (El busto ha bloqueado el haz de luz blanca.) Y, sin embargo, la otra sombra (donde el haz es bloqueado) no parece incolora; tiene el color complementario de la primera sombra. El efecto resulta especialmente sorprendente en partes sombreadas del busto mismo. (En la ilustración las luces de color quedan a la derecha. Los haces se ajustaron para limitar la gama dinámica. Con proyectores y diapositivas se puede producir un efecto más intenso.)

¿Por qué son las sombras de color el reverso de la constancia cromática? En ambos fenómenos, el color atribuido a una luz difiere del que "realmente es": difiere de lo que las propiedades físicas de la luz nos inducirían a predecir. En las sombras coloreadas la distribución idéntica del espectro (es decir, el mismo estímulo físico) tiene colores distintos. Bajo la constancia cromática, distribuciones diferentes presentan el mismo color.

Fundamentalmente, por tanto, los colores que se perciben de los cinco hexágonos grises en la primera composición constituyen una demostración de sombras coloreadas. Imagine el lector que puede ajustar la reflectancia de cada uno de los cuatro hexágonos grises envolventes, de forma que todos parezcan tener el mismo color que el hexágono central (el que tiene el punto). Los cuatro ajustes divergerían. El ejecutante habría conver-

4



5. INTERCAMBIO DIAGONAL DE HEXAGONOS DE COLOR; contribuye en gran medida a que los hexágonos grises parezcan decididamente grises. En esta composición un sólo hexágono de color, que limita con cada hexágono gris, se ha cambiado diagonalmente con su opuesto en la ilustración; advertida esta salvedad, el resto de la primera composición continúa igual. El cambio revela que basta la presencia de una pequeña área de destacada desigualdad espectral para producir el fenómeno de la constancia cromática.

tido las sombras de color (el mismo estímulo parece diferente) en lo que se asemejaría a constancia cromática (diferentes estímulos parecen iguales). Si los hexágonos restantes se revolvieran, como se hizo en la segunda composición, los cinco hexágonos ofrecerían entre sí colores señaladamente distintos.

Evidentemente, el proceso de la información del color que nos ofrecen los datos sensoriales no produce una rígida correspondencia de 1:1 entre color percibido y espectro de luz. En nuestra experiencia diaria al aire libre no existe tal correspondencia; ésta consta de constancias cromáticas y sombras de color por doquier. Por todo ello, las reglas del proceso del color deben ser de tipo diferente de las leyes que regulan las respuestas de los pigmentos visuales a la luz.

Las composiciones contienen ciertas insinuaciones sobre la naturaleza de las reglas. La primera es que los colores se determinan en los lados y vértices (donde se unen los lados). Estos son los únicos lugares de las imágenes donde cambian los datos cromáticos, pudiéndose por ello tomar las relaciones de reflectancia. A este respecto, la primera composición reviste especial interés. Una vez más sugerimos que el lector fije su mirada (con un ojo cerrado) en el punto central de la imagen. Observe cómo los cuatro hexágonos circundantes desaparecen al cabo de unos segundos, después reaparecen y vuelven a desaparecer. Prestando un poco de atención al detalle, el lector debería descubrir que la reaparición siempre acompaña a un movimiento del ojo, de forma que con un poco de práctica podrá controlar la desaparición y reaparición de los hexágonos.

Este es un ejemplo un tanto rudimentario del fenómeno de imágenes estabilizadas en la retina. En el siglo XIX ya se sabía que si se intenta retener una imagen constantemente en la retina, la imagen desaparece substituyéndose por una singular sensación de ceguera denominada “campo vacío”. La desaparición se debe principalmente a que cada receptor del ojo (cada cono) adapta,o se ajusta, a la luz que recibe. Los receptores tienen por misión señalar sólo el cambio al sistema nervioso, pero no alertarle de una condición constante. La visión es buena mientras el ojo pasa de una imagen a otra; pero, cuando el ojo se posa fijo, la visión se deteriora. Esto confirma categóricamente que la información sobre la línea de demarcación y el vértice es crucial para ver, tal y como hemos inferido del fenómeno de la constancia cromática. El ojo debe moverse para que los distintos receptores experimenten la intersección de los lados.

Un segundo punto es el siguiente: el color de un área no depende solamente de lo que la circunda, sino también de la historia acumulativa de la región de la retina sobre la que cae la imagen del área. Es decir, un conjunto de receptores expuestos a numerosas luces diferentes en sucesión producirán una señal acusando cualquier presentación específica de luz que difiera de la señal que producirían si su historia de exposiciones previas no ha sido muy rica. Esta conclusión deriva también de la primera composición. Recordemos que si se fija la mirada en cualquiera de los cuatro hexágonos periféricos, se vuelve rápidamente de color indefinido. Por otra parte, si la imagen se observa someramente, dejando que la mirada vague sobre ella, se continúa teniendo la impresión de cuatro hexágonos de color diferente.

El fenómeno de imagen estabilizada sugiere la explicación. Dado que una imagen estabilizada se desvanece, la estrategia de mirar fijamente cualquier superficie, para determinar su color, resulta ineficaz. Ahora bien, como quiera que los receptores no se adaptan instantáneamente (aparatos modernos demuestran que una imagen, por brillante que sea y contrastada que esté, se desvanece en unos dos segundos), el movimiento activo de la mirada suministra información abundante y variada a los conos.

La segunda composición y las que la siguen nos enseñan la misma lección. Muestran que a medida que el entorno de una región se hace más variado, el color del área gana en definición y estabilidad con el tiempo. Además, el color se convierte en una correlación más fidedigna de la reflectancia del área. En el mundo real, la regla es la diversidad. Raramente se da una representación ordenada del tipo mostrado en la primera composición –excepto en los patrones de camuflaje que confieren a los animales su coloración protectora.

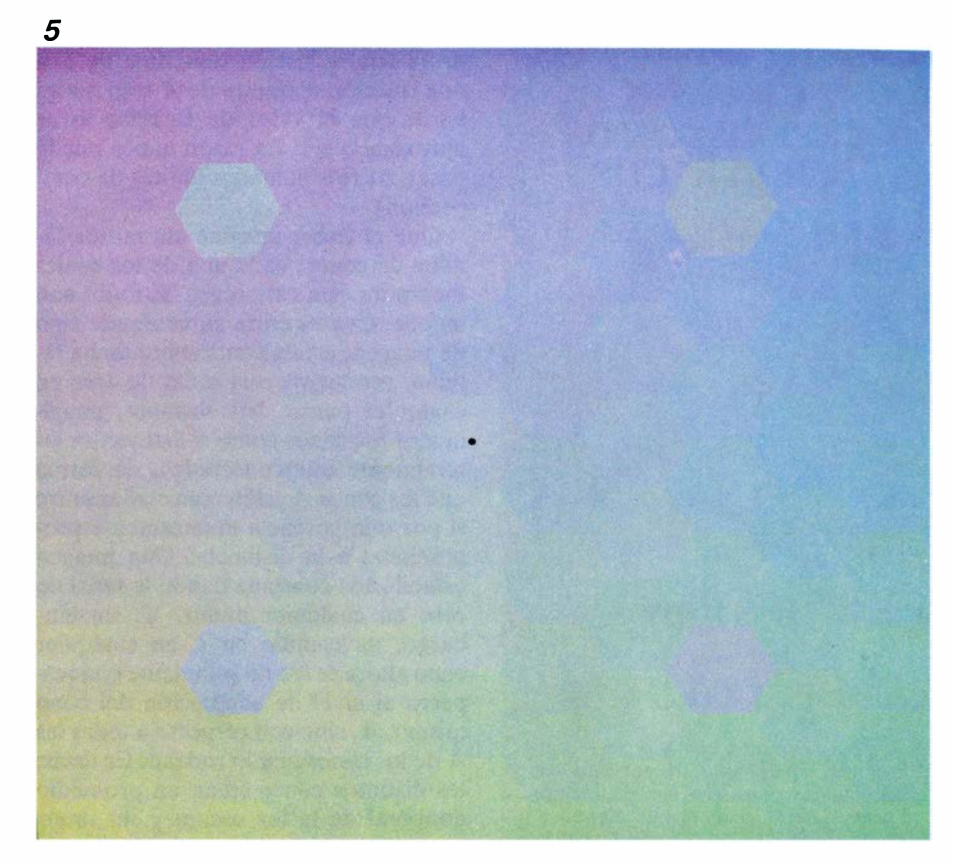
Esta diversidad natural, y el cambio continuo en la dirección de la mirada, aseguran que el entorno espacial de un área y la historia temporal de la exposición de los conos a la luz ofrezcan la amplia variedad que el ingeniero de un sistema de visión en color desearía.

Veamos cuáles son las preocupaciones propias de un ingeniero que emprende el diseño de un sistema de visión en color. Una de las operaciones más útiles en cualquier sistema sensor, natural o artificial, es la de normalización continua. Llamada por los psicólogos adaptación, la conocen los ingenieros por control automático de ganancia. Se trata de ajustar la sensibilidad del sistema al promedio del nivel de entrada, de forma que todos los cambios caigan dentro de los límites de la gama dinámica. Esto se efectúa tomando un promedio progresivo de la entrada y utilizarlo para establecer la ganancia o factor de multiplicación (amplificación). Imaginemos, por ejemplo, el objetivo de una cámara que se vuelve oscuro bajo luz intensa y se aclara bajo luz de menor intensidad, haciéndolo tan bien que fotografías tomadas con el mismo tiempo de exposición bajo la luz luminosa del mediodía o la menos precisa del crepúsculo sean de la misma calidad.

La estrategia del control automático de ganancia, aplicada a la sensibilidad del cono, podría ser así: llamemos L a la intensidad de luz que cae sobre un cono. La historia progresiva de la luz que le llega se designa con A. Esta última es un promedio de las intensidades de las luces que recientemente han llegado al cono, y ajustándose de suerte que el efecto de una luz disminuya en función de su distancia con el pasado. Helmholtz la denominó "luz oscura".

Hallemos la diferencia entre la luz y la luz oscura, dividida por la suma de las dos (es decir, la razón entre $L-A$ y $L+A$). Se consigue el control automático de ganancia. Bajo luz constante, de forma que A (la luz oscura) sea la misma que L (la luz), la relación es cero. Si de pronto L aumenta, la relación resulta positiva; y si el aumento se mantiene, A llega a L y la relación baja de nuevo a cero. Si L disminuye repentinamente, la razón se vuelve negativa y entonces, al reducirse A a L, torna a cero. Si L aumenta o disminuye en una fracción fija de su valor, la respuesta es un cambio fijo en la razón. Por último, un aumento repentino de L hasta un múltiplo inmenso de A sólo puede ha-

5



6



6. LAS MISMAS "ILUSIONES" que las de las dos primeras composiciones se muestran aquí con hexágonos de color, cuya cromaticidad se ha ajustado para que se asemejen a las combinaciones de tintas empleadas en la impresión en color. Es decir, los hexágonos varían gradualmente en brillo de cian (azul verdoso), magenta (rojo purpúreo) y amarillo. Los cinco hexágonos grises de composición parecen nuevamente ser de colores diferentes cuando están rodeados por cromaticidades ordenadas, y los vemos de colores iguales cuando se reordena aleatoriamente su entorno. Como cabría esperar, los colores percibidos de los hexágonos grises difieren de los presentados en la primera composición. (Ilustraciones de B. Howland y D. Deuton.)

cer que la razón se aproxime al valor de 1; una reducción repentina de L a una fracción diminuta de A sólo podrá hacer que el valor de la relación se aproxime a -1. La razón nunca puede pasar ± 1 (los llamados límites de compresión).

Que el lector imagine ahora una lámina de conos, cada uno de los cuales incorpora esta estrategia. Si todos son independientes entre sí, cualquier tipo de imagen, estabilizada sobre dicha lámina, produciría una señal de cero en cualquier punto. No obstante, imaginemos los conos como si estuvieran lateralmente interconectados, de forma que los conos A estén conectados entre sí por una potencia inversamente proporcional a la distancia. Una imagen estabilizada continúa dando la señal de cero en cualquier punto. Y, sin embargo, un cambio en L en cualquier cono ahora se lee no solamente con respecto al nivel de adaptación del cono mismo, A, sino con respecto a todas las A de los conos que lo rodean. Es decir, los distintos conos crean un promedio temporal de la luz oscura y sus interconexiones proporcionan un promedio espacial. Tres láminas interconectadas de tales conos, una para cada uno de los tres pigmentos del cono y numéricamente relacionadas entre sí, crean una referencia tricromática para un cambio de L en cualquier parte de la imagen. Las señales de salida no dan información alguna de las normalizaciones subyacentes; se han ajustado automáticamente por sí mismas para compensar cambios en iluminacio´n. El sistema va por buen camino para conseguir la constancia cromática.

En este punto, la diversidad como característica del mundo real adquiere una importante función. La diversidad permite que la historia de todas las zonas retinianas locales, en el caso de un ojo que vaga, sea generalmente la misma. Permite también que el promedio de las diversas luces que inciden sobre cualquier área retiniana local tenga buenas probabilidades de aproximarse al promedio del campo visual, más amplio, en torno suyo. Además, posibilita que el promedio espacial se asemeje a los promedios temporales. Por esto, la diversidad del mundo asegura que las comparaciones locales a través de las líneas de demarcación ofrezcan buenas probabilidades de producir constancias cromáticas fiables de toda una escena.

La diversidad se aplica a la distribución de luz reflejada, pero también a la distribución de las relaciones de reflectancia a través de líneas de demarcación y alrededor de los vértices. Estas relaciones son independientes, en alto grado, de los tamaños relativos de las áreas que definen, por lo que constituyen la información básica para la visión; una desigualdad de tamaño entre áreas vecinas no reviste mayor importancia si el espectro de desigualdades es lo suficientemente amplio. En efecto, en la cuarta composición, una pequeña superficie de notable desigualdad espectral con respecto al fondo ordenado basta para asegurar la constancia cromática del hexágono gris adyacente.

¿Hasta qué punto esta teoría del color es aplicable al sistema visual humano? Sabemos que el sistema visual emplea una serie de estaciones de proceso. Los conos pasan información a los circuitos nerviosos en la retina, y ésta recluta otras estaciones por medio de su canal de salida: el nervio óptico. El nervio emplea la estructura cerebral denominada cuerpo geniculado lateral, el que a su vez emplea la parte de la corteza cerebral llamada corteza visual primaria. Los conos son, por tanto, los primerísimos elementos de un sistema sensorial complejo. Pudiera parecer sorprendente que les asignemos a ellos, y a sus interconexiones, tanta responsabilidad en el proceso del color.

No obstante, la fisiología ha establecido que la detección de las líneas de demarcación y los vértices comienza en la retina. Y como quiera que cada línea de demarcación significa un cambio en cualidad (por ejemplo, una diferencia en color o brillo), la detección de una línea de demarcación implica la existencia previa de tal cualidad, por lo que puede detectarse cualquier diferencia. (La distinción de una línea de demarcación entre rojo y verde implica la distinción previa de la cualidad de rojo y verde.) Sería sumamente antieconómico, y de poco fiar, que la retina aplazara el proceso del color hasta etapas posteriores del sistema visual, exportando información acerca de cualidades tales como el color a través de canales que están separados de los canales que señalan las líneas de demarcación. Ello requeriría, además, un espacio excesivo para canalización.

Nociones simples de economía llevan, por consiguiente, a la afirmación de que el proceso de los determinantes del color por los conos y su aparato retiniano íntimamente asociado ofrece un sistema fiable –preferible, en nuestra opinión, a cualquier proceso diferido por tejido más central, como la corteza visual–. Queda por ver si ésta es la estrategia que la naturaleza ha escogido.

La fiabilidad de la ciencia

Creatividad y control son las claves del método experimental. Nos permiten obtener conocimientos objetivos mediante teorías abstractas y provisionales, cuya fiabilidad depende, en gran parte, de las sutilezas del método utilizado

Evandro Agazzi, Mariano Artigas y Gerard Radnitzky

¿Puede definir un juez qué es la ciencia? William R. Overton, de Arkansas, se sintió obligado a hacerlo en sentencia dictada el 5 de enero de 1982, con motivo de la polémica americana sobre la enseñanza del evolucionismo. En su definición, y de acuerdo con la epistemología al uso, el magistrado afirma que las teorías deben ser contrastables empíricamente, provisionales y falsables. No menciona la verdad. Esa omisión apunta hacia un problema nada trivial: ¿cuál es la validez de unas teorías que siempre están sometidas a revisiones y refutaciones?

A diferencia de las matemáticas, donde estudiamos objetos abstractos como grupos, funciones y espacios de *n* dimensiones, en la ciencia empírica buscamos conocer y dominar la naturaleza, y sin duda lo conseguimos. La física explora la constitución de la materia hasta dimensiones del orden de 10^{-16} cm (un centímetro dividido en diez mil billones de partes), la biología descubre los mecanismos de la vida llegando a los miles de millones de bases que hay en el ADN de una sola célula, y estos conocimientos nos permiten dominar la naturaleza con éxito manifiesto. Sin embargo, las teorías no son espejos donde se refleja la realidad tal cual es; más bien son redes abstractas construidas con modelos ideales, símbolos matemáticos y otros elementos que también son creaciones nuestras. ¿Cuáles son las garantías de que esos constructos teóricos se refieren a estructuras y procesos reales?

Estos interrogantes remiten al problema de la fiabilidad. En el ámbito de la técnica, el término *fiabilidad* designa las garantías del buen funcionamiento de los aparatos o dispositivos. Lo introducimos aquí en el sentido siguiente: una construcción teórica es fiable en la medida en que sirve para alcanzar el objetivo de la investigación; éste es doble: el conocimiento de la naturaleza (aspecto teórico) y su dominio (aspecto práctico).

El nacimiento de la ciencia moderna estuvo acompañado por fuertes polémicas sobre su fiabilidad. En el prefacio al *De Revolutionibus* de Nicolás Copérnico se afirmaba que el sistema heliocéntrico era solamente una hipótesis útil para los cálculos, y Galileo motivó serias controversias por no atenerse a esa opinión. Desde que Isaac Newton publicó su teoría de la mecánica la situación cambió, pero esta vez se creó una confianza exagerada, admitiéndose que la mecánica newtoniana tenía valor universal y definitivo. Ya en nuestro siglo, las teorías cuántica y relativista mostraron que no era así. Actualmente contamos con una perspectiva histórica amplia que, junto con el desarrollo de la epistemología en las últimas décadas, nos permiten plantear de modo adecuado el problema de la fiabilidad.

Los *Principios matemáticos de la filosofía natural* de Newton fueron publicados en 1687, hace ahora 300 años. De acuerdo con el título de la obra, Newton buscaba conocer la naturaleza utilizando conceptos matemáticos. Para conseguirlo definió un sistema que consta de puntos dotados de masa y sometidos a fuerzas, cuyo movimiento se expresa mediante velocidades y aceleraciones. Se trata de una idealización que permite efectuar demostraciones matemáticas, y se relaciona con la realidad a través de reglas de correspondencia; por ejemplo, se demuestra que la fuerza de atracción del Sol es equivalente a la que ejercería si toda su masa estuviera concentrada en un punto situado en su centro; a esos efectos el modelo funciona correctamente.

La teoría se refiere directamente al modelo ideal, que es su objeto. No hablamos de la Tierra o del Sol, sino de puntos. La velocidad, la aceleración, la fuerza y la masa son magnitudes que se definen matemáticamente. Los enunciados y las demostraciones son matemáticos. Por tanto, la teoría se refiere a los objetos reales de modo indirecto, a través del objeto ideal. Es fiable porque los enunciados teóricos se aplican con éxito al estudio de fenómenos reales. Algo semejante ocurre en otras disciplinas. ¿Cuál es la clave del éxito? Que se encuentren procedimientos para construir objetos ideales que correspondan a situaciones reales. Esta tarea requiere genios. Cuando Gregor Mendel leyó las conclusiones de su trabajo ante la sociedad científica de Brün en 1865, encontró una reacción escéptica ante la mezcla, entonces insólita, de biología y matemáticas. La teoría atómica se abrió paso, de modo parecido, ante la indiferencia e incluso hostilidad de quienes desconfiaban de hipótesis muy alejadas de la experiencia ordinaria.

¿Cómo se construye el objeto ideal de una teoría? Suele hablarse de sistemas, propiedades y estados. Un sistema representa aquello de lo que tratan las teorías: partículas, campos electromagnéticos, sistemas termodinámicos, etcétera. No son necesariamente *cosas*: una misma cosa, por ejemplo el cerebro, puede estudiarse por la fisiología o la electricidad según las propiedades que se consideren. Determinados conjuntos de propiedades especifican el estado de un sistema: así sucede con la presión, el volumen y la temperatura de un gas en termodinámica o con las posiciones y momentos de las partículas en mecánica.

Mediante conceptos clasificatorios (átomos, ácido, masa) dividimos en clases los sistemas o propiedades según posean o no determinadas características. Si establecemos un orden obtenemos conceptos comparativos (por ejemplo, comparando las masas con una balanza). Si fijamos escalas y unidades, obtenemos los conceptos cuantitativos o métricos, denominados magnitudes, que se definen en relación con teorías matemáticas y experimentos repetibles. Por ejemplo, en el caso de la

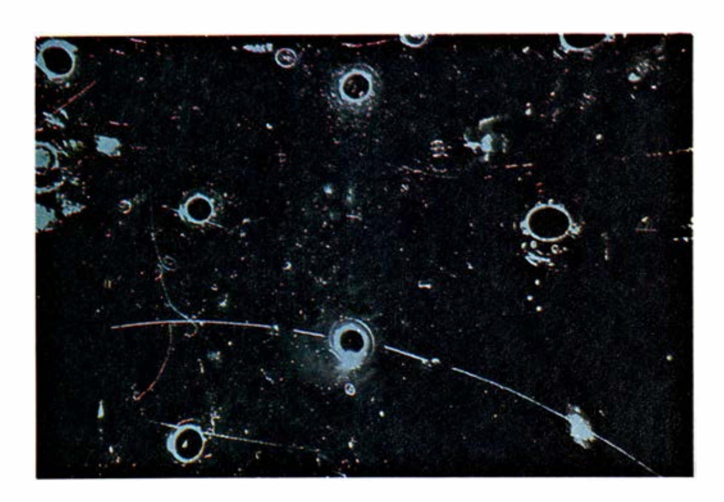
masa hay que especificar que se trata de una magnitud escalar y aditiva, e indicar métodos para medirla; así deja de ser un concepto intuitivo y se convierte en una construcción teórica que se aplica a ámbitos tan alejados de la experiencia como el de las partículas subatómicas.

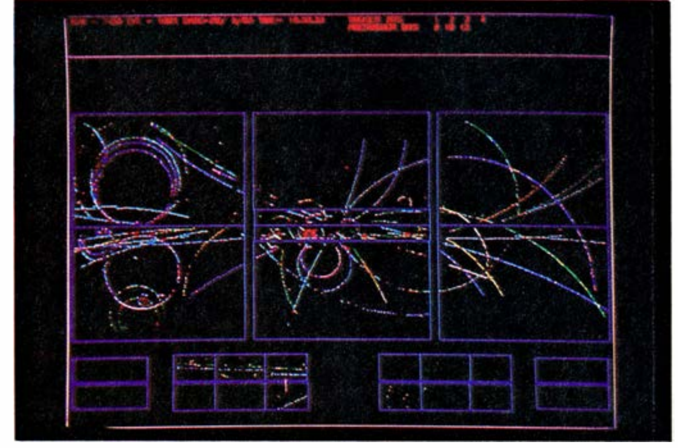
Para determinar el objeto de una teoría no basta construir conceptos; necesitamos relacionarlos mediante leyes. Cuando una disciplina está en sus comienzos, la dificultad es notable y se requiere un proceso verdaderamente creativo. Newton estableció sus leyes mecánicas porque trabajó, según su propia expresión, a hombros de gigantes (como Galileo y otros). La teoría electromagnética se consolidó gracias a las leyes que, en pocas décadas, obtuvieron Charles Augustine Coulomb, André Marie Ampère, Hans Christian Oersted y Michael Faraday. Las leyes de Mendel fueron el resultado de un esfuerzo genial aislado.

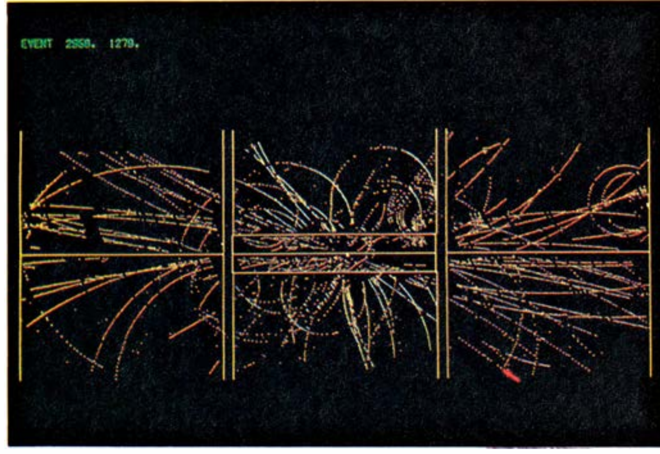
¿Hay alguna relación entre la creatividad y la fiabilidad? No la hay si consideramos el aspecto psicológico: la historia de la manzana no afecta a la validez de la mecánica de Newton. En este sentido, el contexto de descubrimiento (cómo surgen nuevas ideas) es irrelevante para el contexto de justificación (cómo se comprueban). Sin embargo, eso no es todo. Existen diversas posibilidades de construir objetos; entre ellas se elige una, y esto determina la base de la teoría. De modo más explícito: cada objetivación se realiza adoptando un punto de vista, o sea, formulando conceptos y leyes con la ayuda de criterios operativos para interpretar los resultados de los experimentos. En la mecánica newtoniana se definen las magnitudes básicas (masa, velocidad, fuerza, etc.), se establecen criterios para medirlas y se formulan los postulados fundamentales de la teoría (leyes de Newton); la validez de las demostraciones posteriores dependerá de estos elementos, que no se descubren: se construyen.

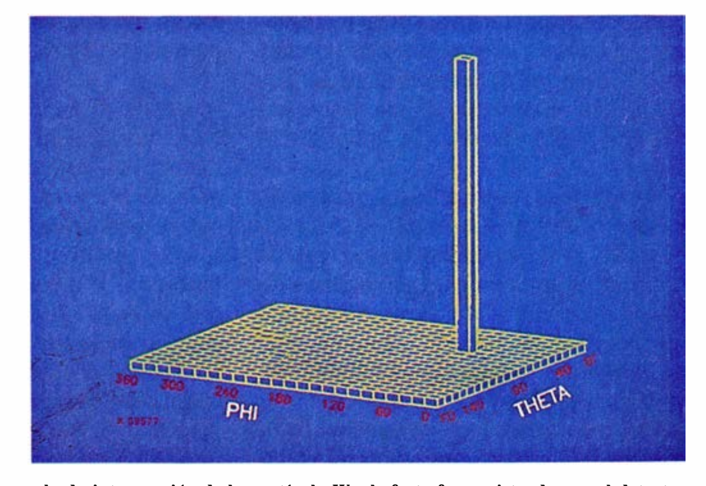
Detengámonos en el valor de las demostraciones. Existen dos tipos de inferencias: la inducción, que consiste en remontarse desde los casos particulares hasta las leyes generales, y la deducción que es el procedimiento inverso.

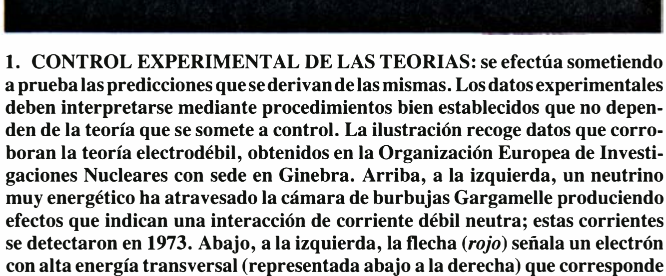
Durante mucho tiempo se pensó que el método científico por excelencia era la inducción, gracias a la cual se pasaría desde la experiencia hasta las leyes y desde éstas hasta las teorías utilizando sólo hechos y lógica. Pero, desde el primer momento, en la formulación de las leyes y de las teorías intervienen construcciones nuestras. Mediante balanzas y pesas no podemos determinar si la masa es una magnitud escalar y cómo se relaciona con el peso; apenas obtendremos algo de interés para la física a menos que utilicemos la segunda ley de Newton y la ley de la gravedad (por



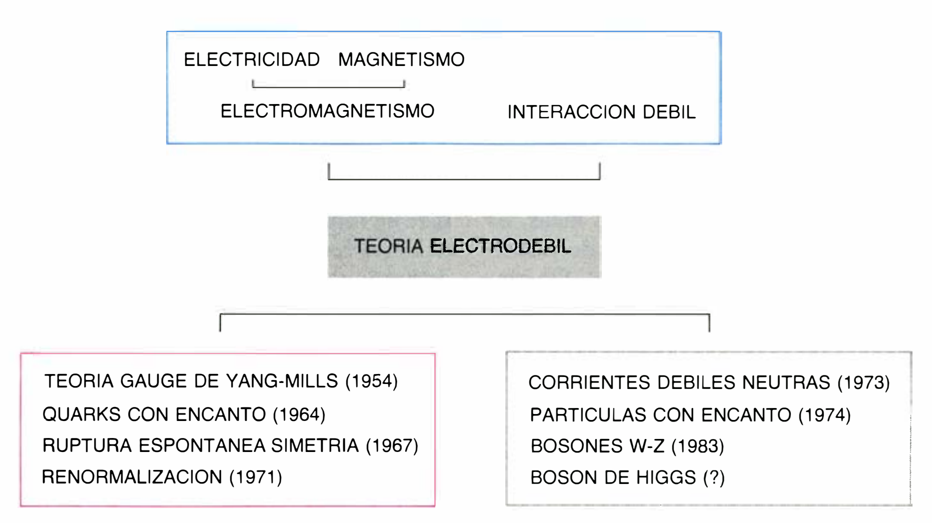








1. CONTROL EXPERIMENTAL DE LAS TEORIAS: se efectúa sometiendo a prueba las predicciones que se derivan de las mismas. Los datos experimentales deben interpretarse mediante procedimientos bien establecidos que no dependen de la teoría que se somete a control. La ilustración recoge datos que corroboran la teoría electrodébil, obtenidos en la Organización Europea de Investigaciones Nucleares con sede en Ginebra. Arriba, a la izquierda, un neutrino muy energético ha atravesado la cámara de burbujas Gargamelle produciendo efectos que indican una interacción de corriente débil neutra; estas corrientes se detectaron en 1973. Abajo, a la izquierda, la flecha (*rojo*) señala un electrón con alta energía transversal (representada abajo a la derecha) que corresponde a la desintegracción de la partícula *W*; el efecto fue registrado por el detector UA1 en enero de 1983. Arriba, a la derecha, se ilustra un par electrón-positrón producido por la desintegración de la partícula *Z*; lo registró el mismo detector en mayo de 1983. Las partículas *W* y *Z* son los bosones que transmiten la fuerza débil. No se detectan directamente. Se producen en las colisiones protón-antiprotón a altas energías y se desintegran en menos de 10^{-24} segundos dando lugar a sucesos como los recogidos abajo a la izquierda y arriba a la derecha. Las magnitudes medidas están de acuerdo con las predicciones de la teoría electrodébil. Carlo Rubbia y Simon van der Meer recibieron el Nobel de física de 1984 por los trabajos que condujeron a la detección de las partículas *W* y *Z*.



2. ESTRUCTURA Y DINAMICA DE LAS TEORIAS, ejemplificadas en el caso de la teoría electrodébil. Esta cumple uno de los objetivos primordiales de la investigación: conseguir explicaciones unitarias de fenómenos diversos, en este caso las interacciones electromagnética y débil. James Clerk Maxwell unificó la electricidad y el magnetismo en su teoría del electromagnetismo (1864). La fuerza débil fue descubierta a finales del siglo pasado en relación con la desintegración beta de los núcleos atómicos. La teoría electrodébil se formuló entre 1961 y 1968. (Sheldon Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg recibieron por ello el premio Nobel de física en 1979.) Esta tarea requirió planteamientos altamente especulativos (*en rojo*). Las teorías gauge proporcionan el marco de las actuales teorías cuánticas de campos. Los quarks con encanto explican por qué no se producen corrientes débiles neutras con cambio de extrañeza. La ruptura espontánea de la simetría entre las dos interacciones explica la masa de las partículas *W* y *Z*. Se demostró que la teoría es renormalizable, siendo por tanto posible cancelar las cantidades infinitas que aparecen. De tales planteamientos teóricos resultan consecuencias experimentales (*recuadro en gris, abajo*). Se ha comprobado la existencia de las corrientes débiles neutras y de las partículas *W* y *Z* (*véase la figura 1*). La detección de la partícula J/psi (1974) fue el primer indicio de partículas con encanto, y valió a Burton Richter y Samuel Ting el premio Nobel de física de 1976. La detección del bosón de Higgs, que interviene en el mecanismo por el que adquieren masa las partículas *W* y *Z*, supondría una nueva corroboración empírica y hoy es objeto de investigación.

tanto, toda una teoría de la mecánica). La suma de datos empíricos es insuficiente para definir una magnitud. La medición sólo es significativa si disponemos de teorías para construir los instrumentos e interpretar sus datos. Así, para medir la temperatura debemos admitir leyes que la relacionen con las substancias termométricas (líquidos, gases, pares termoeléctricos); cada tipo de medición tiene su ámbito de validez, y la definición teórica de la temperatura se basa en un conjunto de conceptos y leyes de la termodinámica. Las teorías no se construyen por simple generalización inductiva de casos particulares.

Ahora bien, utilizamos la inducción en dos sentidos. El primero y más inmediato es un supuesto básico: que la naturaleza se comporta de modo uniforme en igualdad de circunstancias. Si no fuera así, no tendría sentido hablar de experimentos repetibles y toda la investigación caería por su base.

En otro sentido, utilizamos argumentos inductivos semejantes a los clásicos de Francis Bacon y John Stuart Mill. Investigamos la causa de efectos conocidos observando en qué grado coinciden las causas posibles con los efectos. Esta argumentación se basa en principios que caen fuera de la lógica, como la regularidad de la naturaleza. No puede subestimarse su importancia. Por ejemplo, sirvió a Faraday para probar que las diversas manifestaciones de la electricidad se deben a una misma causa. Pero se trata de un tipo de razonamiento que no es concluyente, ya que pueden existir causas desconocidas. Por ese motivo formulamos hipótesis acerca de causas que expliquen los efectos conocidos: cuando se descubrió que la electricidad se debe al flujo de electrones quedó patente por qué coincidían los efectos de los diversos fenómenos eléctricos.

Desde el punto de vista lógico, las teorías son sistemas hipotético-deductivos de enunciados. Los *Principios* de Newton ya fueron redactados así: se establecen las definiciones y postulados básicos, que funcionan como hipótesis, y se deducen consecuencias que puedan compararse con la experiencia (contrastación empírica). Las leyes son enunciados hipotéticos cuyo valor debe comprobarse experimentalmente.

¿Cómo se demuestran las hipótesis según este método? La respuesta de la lógica deductiva es: de ninguna manera. Un sencillo ejemplo lo aclara. Supongamos, como hipótesis, la proposición "todos los animales vuelan". Y deducimos de esa hipótesis que los pájaros, que son animales, vuelan. La consecuencia es verdadera, y, sin embargo, la hipótesis es falsa. Esto responde a la regla lógica según la cual de una falsedad pueden deducirse consecuencias verdaderas. Dicho académicamente: de la verdad del consiguiente no se sigue la del antecedente. En cambio, basta un solo caso negativo para demostrar la falsedad del antecedente: en el ejemplo anterior, es suficiente encontrar un solo animal no volador. Esta situación se resume diciendo que existe una asimetría lógica entre la verificación y la falsación de las hipótesis. La consecuencia es que nunca podrá demostrarse lógicamente que una hipótesis general es verdadera. De aquí suele concluirse que los enunciados y teorías (sistemas de enunciados) siempre son conjeturales y provisionales. Parecería que la epistemología retrocede al siglo XVII, afirmando que la ciencia se limita a "salvar las apariencias" o fenómenos mediante hipótesis posibles pero no verdaderas. ¿Es así?

Por fortuna, no lo es. Existen criterios para juzgar la validez de las hipótesis. Su fundamento es el siguiente: cuantas más consecuencias de tipos distintos se confirmen, podemos confiar más en las hipótesis de donde se deducen, sobre todo si se trata de predicciones precisas y antes desconocidas (no cuenta sólo la cantidad de pruebas, muchas veces tiene más peso una sola que sea suficientemente específica).

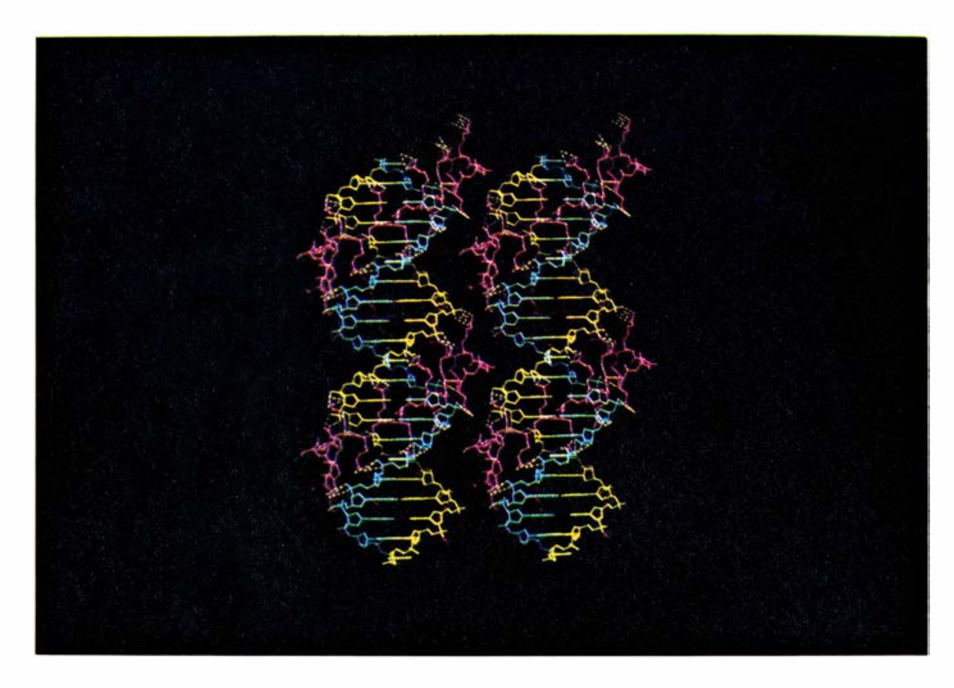
Un primer criterio es el poder explicativo. La estructura en doble hélice del ADN da razón de la conservación y transmisión del material genético; es lógico que se admitiera inmediatamente (las pruebas empíricas tardaron tiempo en ser concluyentes). Que la mecánica cuántica y la relatividad permitan obtener los resultados de la mecánica clásica cuando se establecen los supuestos correspondientes (grandes masas y pequeñas velocidades respectivamente) es una prueba de su validez.

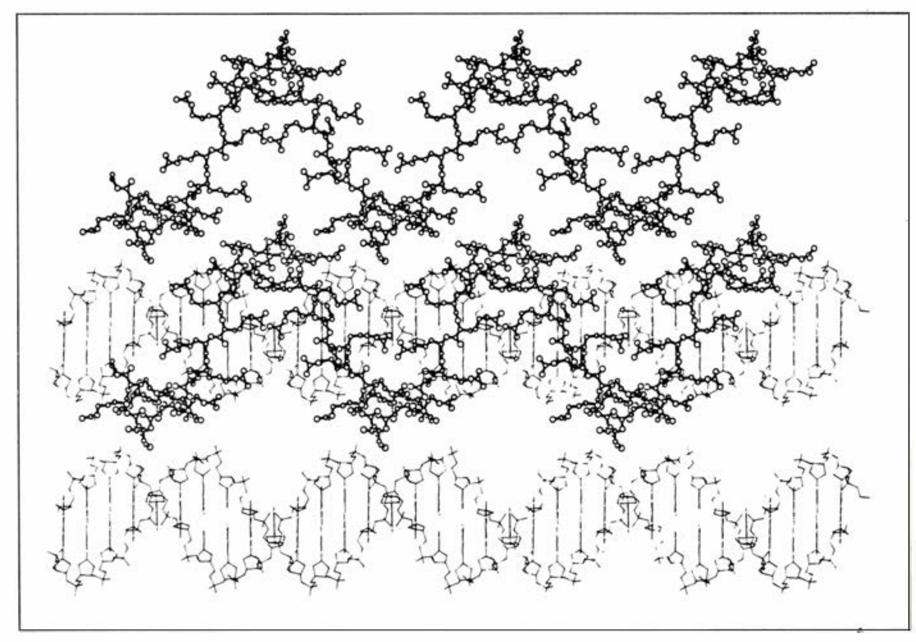
El segundo criterio es el poder predictivo. Es semejante al primero, pues una hipótesis explica y predice lo que de ella se deduce; pero nos referimos ahora a predicciones antes desconocidas. Este es el criterio más llamativo en favor de la fiabilidad de las teorías. Por ejemplo, el efecto de un planeta sobre otros tal como lo predecía la mecánica clásica condujo al descubrimiento de Neptuno y Plutón en las posiciones calculadas por la teoría. De la relatividad especial resultó la equivalencia calculable entre masa y energía, que está en la base de la física atómica y de sus aplicaciones. La relatividad general predijo que la luz está sometida a la gravitación, y la confirmación de este fenómeno en 1919 fue un apoyo sus-

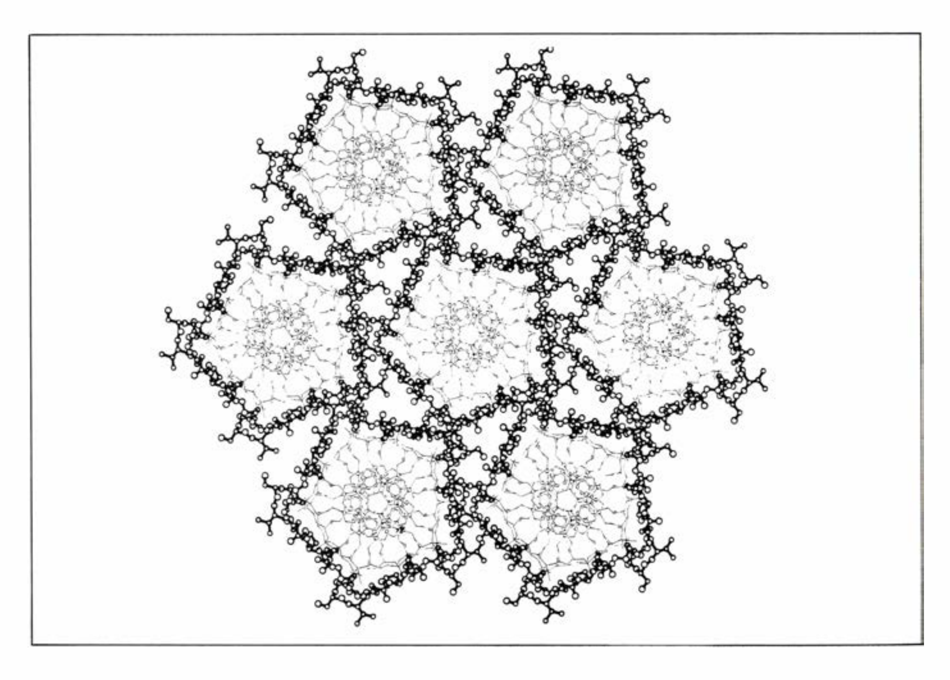
tancial a la teoría. El modelo de la gran explosión, propuesto en la década de 1920, recibió un apoyo decisivo cuando Arno Penzias y Robert Wilson detectaron en 1964, sin buscarla, la radiación de microondas predicha por la teoría. La detección de las partículas *W* y *Z* en las condiciones previstas por la teoría electrodébil ha sido igualmente una confirmación de gran importancia, como lo sería para las teorías actuales de gran unificación la buscada desintegración del protón.

La precisión es un tercer criterio que refuerza los dos anteriores. El progreso débese en buena parte a la exactitud de los cálculos y comprobaciones. Johannes Kepler invirtió dos años en sus primeros estudios sobre la órbita de Marte, pero recomenzó al detectar un desacuerdo de 8 minutos de arco respecto a los datos de Tycho Brahe (diferencia a la que entonces no se concedía mayor interés). Para comprobar la deflexión gravitatoria de la luz se organizaron expediciones de astrónomos a Brasil y Africa con objeto de medir las pequeñas desviaciones de la luz de una estrella próxima al sol durante un eclipse. La corroboración de una teoría depende en gran medida de la exactitud de sus predicciones.

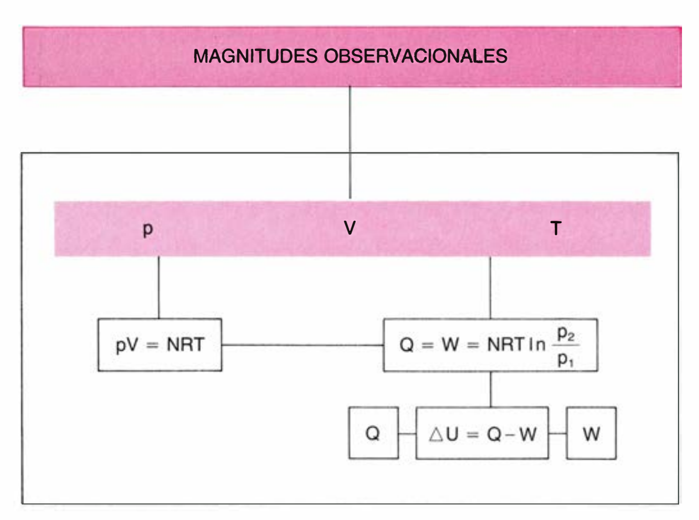
La convergencia de pruebas variadas e independientes es un cuarto criterio que refuerza la fiabilidad. Por ejemplo, el modelo de la gran explosión predice fenómenos tan diversos como la radia-



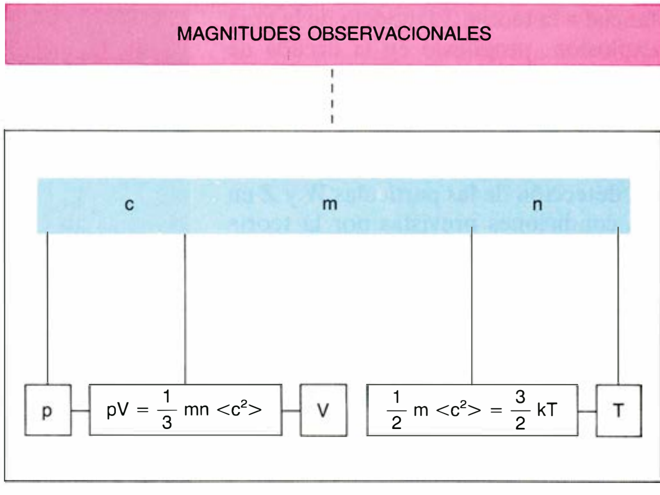




3. VALIDEZ DE LOS MODELOS. Recurrimos a modelos de diversos tipos para representar estructuras o procesos que no podemos observar directamente. El progreso de las técnicas instrumentales desempeña una función importante en la construcción de los mismos. Se ilustran aquí resultados obtenidos mediante la difracción de rayos X, que permite visualizar los grupos que componen las moléculas biológicas. La fotografía y los dibujos realizados por ordenador, obtenidos por Luis Puigjaner, Ignacio Fita y Juan A. Subirana (de la Universidad Politécnica de Cataluña) en el laboratorio de S. Arnott (Universidad de Purdue, Indiana) muestran diversos aspectos de la estructura de las nucleoprotaminas. Las protaminas son proteínas que interactúan con el ADN protegiendo la información genética. En la fotografía la cadena ascendente del ADN está en azul, la descendente en amarillo y la protamina en violeta. Los dos dibujos muestran el ADN y la protamina separados (*centro*) y la proyección de una molécula de nucleoprotamina rodeada por otras seis (*abajo*). La información utilizada se obtuvo a partir de los diagramas de difracción de fibras (conjuntos de microcristales orientados) de nucleoprotaminas. La interpretación de los diagramas se realiza mediante teorías y técnicas bien establecidas tales como la teoría matemática de las transformadas de Fourier y la teoría de la difracción por moléculas helicoidales (entre las que se encuentra el ADN). Se exige que los modelos expliquen toda la información adicional disponible (como la obtenida por microscopía electrónica). La técnica que utiliza cristales en lugar de fibras es aún más segura, pero no puede utilizarse con el ADN *in vivo*. El modelo obtenido, aun siendo muy fiable, no es definitivo y ha de valorarse por las consecuencias que de él se derivan.







4. NIVELES FENOMENOLOGICO Y REPRESENTACIONAL. En un modelo fenomenológico (*izquierda*) no formulamos hipótesis sobre la constitución interna del sistema estudiado; sí lo hacemos en un modelo representacional (*derecha*). Para construir un modelo fenomenológico utilizamos magnitudes observacionales como la presión p, el volumen V, el número N de moles y la temperatura T en el caso de un gas. Los conceptos y enunciados de la teoría se refieren al modelo, que por su parte tiene una conexión directa con los fenómenos experimentales. En la ilustración se esquematiza lo siguiente: dos conceptos básicos, el calor Q y el trabajo W; la ley de los gases ideales que relaciona p, V y T (R es la constante de los gases ideales); el primer principio de la termodinámica que define la energía interna U, y una ecuación que relaciona Q, W, T y p para cambios isotérmicos del sistema. El modelo representacional contiene hipótesis sobre magnitudes inobservables como el número de partículas n, su masa m y su velocidad c, que están conectadas con las magnitudes observables (en este caso p, V y T) mediante ecuaciones como las dos indicadas, donde k es la constante de Boltzmann. Se refiere a la experiencia indirectamente, a través de enunciados que se relacionan con magnitudes observables. Aunque en el nivel fenomenológico conseguimos conclusiones más seguras, las hipótesis representacionales nos permiten alcanzar explicaciones más profundas y por tal motivo tienen gran importancia para el progreso. Ambos enfoques se complementan.

ción de microondas, la abundancia relativa de los elementos ligeros y la distribución de materia en el universo.

En quinto lugar, las teorías se apoyan mutuamente cuando una de ellas se utiliza con éxito en el ámbito de otras. De este modo, además de contar con otras pruebas, la teoría atómica fue ganando fiabilidad al integrarse en las explicaciones y predicciones de diversas disciplinas.

Aplicamos estos criterios de diferente manera según se trate de teorías fenomenológicas o representacionales.

Si bien siempre buscamos explicaciones y predicciones, lo hacemos de diferentes modos que dependen de los datos disponibles y de las construcciones teóricas utilizadas. Veamos dos ejemplos extremos. Obtenemos la ley de los gases perfectos estudiando las correlaciones entre la presión, el volumen y la temperatura en condiciones experimentales muy concretas; las construcciones teóricas que necesitamos son muy sencillas y la comprobación de la ley es segura, pues nos movemos en un nivel muy cercano a la experiencia. Este enfoque se llama fenomenológico por su proximidad a los fenómenos. En cambio, el modelo de la gran explosión sobre el origen del universo representa procesos producidos hace quince mil millones de años; formulamos hipótesis muy alejadas de nuestra experiencia, extrapolamos leyes conocidas a circunstancias muy diferentes de las actuales y obtenemos algunas consecuencias comprobables empíricamente. Este enfoque se denomina representacional, pues utilizamos modelos hipotéticos para representar estructuras y procesos inobservables. Evidentemente hay muchos casos intermedios entre estos dos extremos.

En el enfoque fenomenológico obtenemos explicaciones y predicciones muy seguras pero poco profundas, mientras que en el representacional aumenta la profundidad a costa de la seguridad. Ambos se complementan. En los comienzos de una disciplina suelen obtenerse leyes fenomenológicas que hacen posible la formulación de hipótesis representacionales; por ejemplo, las leyes cinemáticas de Kepler y Galileo condujeron a la dinámica de Newton, y las leyes de Mendel abrieron paso a la hipótesis de los genes. Qué es fenomenológico y qué es representacional depende del estado de nuestros conocimientos.

A lo largo del siglo pasado se desarrolló una polémica entre partidarios de uno y otro enfoque en la física: Friedrich Wilhelm Ostwald y Ernst Mach se opusieron a la teoría atómica por tratarse de una hipótesis sobre entidades inobservables. Pero nuestro conocimiento ha progresado enormemente gracias a hipótesis representacionales. No buscamos solamente la certeza que puede conseguirse con los medios actuales de observación. Formulamos conjeturas especulativas y exigimos que sean controlables empíricamente. Este modo de proceder garantiza la fiabilidad mucho mejor que la actitud de poner límites a las hipótesis representacionales. Hoy día las medidas más fiables se obtienen recurriendo a fenómenos atómicos.

Todas las teorías versan sobre modelos ideales, que se refieren a los fenómenos reales mediante reglas de correspondencia. Esto es así tanto en las teorías fenomenológicas como en las representacionales. Sin embargo hay diferencias importantes. El objeto de la teoría fenomenológica se define mediante conceptos observacionales, como la presión, el volumen y la temperatura en termodinámica, y las reglas de correspondencia relacionan las magnitudes teóricas con sus valores medidos. Por refinados que sean los constructos teóricos que utilicemos, se trata de instrumentos auxiliares para relacionar los conceptos observacionales. Por tanto, una vez fijadas las reglas de correspondencia, la comprobación de los enunciados teóricos se realiza sin dificultad, ya que los conceptos que utilizamos o bien son observacionales o bien se reducen a ellos.

No sucede así con las teorías representacionales, cuyo objeto se define mediante propiedades inobservables. Por ejemplo, las partículas subatómicas se caracterizan por su masa, carga, espín, etc. Aunque esas propiedades se denominan "observables", los únicos

datos de experiencia son trazas de ionización y otros efectos que se producen en los detectores. Midiendo la curvatura de las trayectorias por efecto de campos magnéticos se deduce el momento de una partícula, y por métodos igualmente indirectos se calculan las masas, velocidades y otras propiedades. Un método habitual para detectar nuevas partículas consiste en suponer que se desintegran de un modo determinado y que de ahí resultan efectos detectables. En estos casos comprobamos solamente las consecuencias observables.

En cualquier caso, para comprobar empíricamente las teorías recurrimos a datos de experiencia. Solemos llamar "datos" a los hechos manifiestos, algo que se nos ofrece y no puede manipularse. Los experimentos de Mendel responden a esta idea. Mendel seleccionó 22 variedades de guisantes y 7 propiedades fáciles de distinguir (tamaño de la semilla, forma de la planta, color de los cotiledones, etc.). Cada primavera obtenía datos relevantes para sus hipótesis. Eran hechos y propiedades observables con independencia de su posterior interpretación.

Pero cuando utilizamos instrumentos de medición no observamos intensidades de corriente, longitudes de onda o electrones, sino señales, espectros, anillos de difracción y otros indicadores que sólo adquieren significado a la luz de las correspondientes teorías. Los datos no son entonces el simple resultado de la observación.

Frecuentemente, los datos se producen mediante técnicas depuradas. La difracción de rayos X es una técnica estandarizada para estudiar la estructura de las moléculas biológicas. La detección de las partículas *W* y *Z* exigió el trabajo de más de un centenar de físicos durante cinco años en instalaciones construidas a tal efecto en la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN). El proyecto se aprobó el 29 de junio de 1978. El 3 de julio de 1980 comenzó a funcionar el Acumulador de Antiprotones, donde se forman paquetes de centenares de miles de millones de partículas y se consigue que sus energías se concentren alrededor de un valor conveniente. El Super Sincrotrón de Protones, subterráneo y de 7 kilómetros, se transformó en una máquina de colisión de haces protón-antiprotón a la energía de 270 GeV por haz (1 gigaelectronvolt equivale a mil millones de electronvolt), y recibió por primera vez antiprotones en febrero de 1981, alcanzando la energía mencionada el 7 de julio de ese año. En enero de 1983 se obtuvo la primera indicación de que algunas colisiones entre los miles de millones producidas podría corresponder a la partícula *W*. El 25 de enero se anunció el descubrimiento de la *W* y el 1 de junio el de la *Z*.

¿Cuáles fueron los datos obtenidos? Los informes mencionaban que se había observado experimentalmente electrones con momento transversal elevado en cuatro sucesos específicos (en el caso de la *W*) y pares de leptones con masa invariante en circunstancias igualmente determinadas (en el caso de la *Z*). Tales datos estaban de acuerdo con las predicciones de la teoría electrodébil acerca de los bosones vectoriales intermedios *W* y *Z*.

Para obtener e interpretar esos resultados hay que utilizar teorías. Surge, pues, un interrogante: ¿qué valor tiene la confirmación empírica si se basa en datos mediatizados por teorías? Desde luego, la comprobación es válida con una condición: que para obtener los datos utilicemos teorías ya aceptadas, diferentes de la que estamos comprobando. En nuestro caso, la teoría electrodébil predice que las partículas *W* y *Z* se desintegran dando lugar a electrones aislados y pares de leptones que se detectan mediante procedimientos bien establecidos. Pero sólo hemos respon-

	TERMOMETRO			
	DE GAS	DE LIQUIDO	DE RESISTENCIA	PAR TERMOELECTRICO
MAGNITUD TERMOMETRICA	Presión o volumen	Volumen	Resistencia eléctrica	Fuerza electromotriz
FUNDAMENTO DEL METODO	Ley de los gases ideales	Dilatación térmica	Variación de la resistencia con la temperatura	Efecto Seebeck
INTERVALO DE UTILIZACION	Helio 3: a partir de 0,5 K	Mercurio: de 234 K a 633 K	Platino: de 20 K a 1473 K	Platino-Platino-Rodio: de 273 K a 1873 K
ELECCION DE ESCALA	Centígrada o Celsius, termodinámica o de temperaturas absolutas, Fahrenheit, Rankine, etcétera.			
CALIBRADO Y MEDIDA	Se han de determinar temperaturas fijas: en la escala práctica internacional se toman once puntos fijos de referencia, desde el punto triple del H_2 (13,81 K) al punto de fusión del oro (1337,58 K). Ha de determinarse empíricamente la dependencia de la propiedad termométrica con la temperatura.			
SUPUESTOS BASICOS TERMODINAMICOS	Principio cero: dos sistemas en equilibrio térmico con un tercero están en equilibrio entre sí. Implica teorías sobre las nociones de sistema termodinámico, estado de un sistema y equilibrio de contacto (en este caso es térmico).			

5. CONTROL EXPERIMENTAL DE LAS MAGNITUDES. En este caso, la medición de la temperatura mediante cuatro tipos de termómetro. Se señalan supuestos necesarios para medir. Hay que relacionar la temperatura con otras magnitudes, para lo cual debemos utilizar leyes. Cada procedimiento tiene un ámbito limitado de validez. Se han de adoptar acuerdos acerca de las escalas y puntos de referencia, que exigen aceptar conceptos básicos de la termodinámica. Por tanto, las operaciones de medición no bastan para definir las magnitudes: el control experimental se basa en estipulaciones que no están determinadas sólo por los hechos observados. Una vez fijados los supuestos, se obtienen resultados comprobables intersubjetivamente.

	ECUACIONES DE ESTADO	
	ECUACION DE LOS GASES IDEALES	ECUACION DE VAN DER WAALS
FORMULACION (para un mol de gas)	$pv = RT$	$(p + \frac{a}{v^2})(v-b) = RT$
FUNDAMENTO EMPIRICO	Generalizaciones empíricas de Boyle, Mariotte, Charles y Gay-Lussac	Corrección de desajustes empíricos en la ecuación de los gases ideales
MODELO	En un mol de gas hay un número enorme de moléculas de volumen despreciable en movimiento aleatorio. No ejercen fuerzas de atracción o repulsión salvo en los choques, que se suponen perfectamente elásticos	Se tiene en cuenta el volumen de las moléculas (constante b que se resta del volumen) y la atracción entre ellas (factor con la constante a que se añade a la presióan)
LIMITES DE VALIDEZ	Bajas presiones	Descripción cualitativa de las propiedades de los gases reales, incluyendo la transición gas-líquido

6. VALIDEZ DE LAS LEYES EXPERIMENTALES. Se toman como ejemplo dos de las ecuaciones de estado que se aplican a los gases. La comprobación experimental supone que se acepten las teorías y métodos necesarios para medir cada magnitud. Las leyes son válidas en un determinado ámbito de condiciones y son aproximativas, no mera traducción de las leyes de la naturaleza. Pero tampoco son simples estipulaciones o instrumentos de previsión: proporcionan conocimientos que están fundamentados y son comprobables.

dido a medias. En efecto, la pregunta que necesariamente se plantea a continuación es: ¿existen datos que no estén afectados por teorías?

Podría pensarse que la percepción o la experiencia inmediata sería una base suficiente para establecer datos incontrovertibles. Ahora bien, aunque admitimos el valor de la experiencia ordinaria, ésta representa sólo una pequeña parte de los datos experimentales utilizados en las disciplinas más desarrolladas. De hecho, si intentamos reconstruir las teorías tomando como base las percepciones subjetivas, no conseguiremos formular ni siquiera los enunciados más elementales.

Sin embargo, la situación no es desesperada. Podemos basar las teorías en hechos comprobables. En efecto, una vez establecido un punto de vista, obtenemos unos datos concretos y no otros. Esto es un hecho que se puede demostrar. Los efectos observables de las partículas *W* y *Z* estaban fijados de antemano y se produjeron de acuerdo con las características previstas. De modo semejante, si aplicamos la teoría electromagnética encontraremos resultados precisos en los experimentos sobre la frecuencia de la luz; la teoría cuántica añade nuevas interpretaciones sobre la luz al introducir los cuantos del campo electromagnético o fotones, pero no invalida los datos bien comprobados anteriormente.

En definitiva, los datos experimentales tienen su ámbito de validez propio, y al mismo tiempo están abiertos a nuevas explicaciones y precisiones. Esta circunstancia no es un inconveniente para su fiabilidad; por el contrario, constituye uno de sus rasgos principales, pues nos permite alcanzar conocimientos válidos sin cerrar las puertas al progreso.

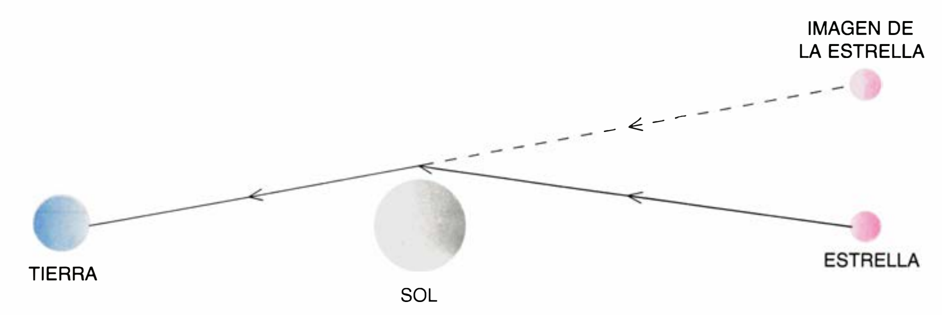
¿Cuál es la validez de los enunciados? Fijémonos en tres tipos que tienen especial relevancia: los enunciados observacionales, las leyes experimentales y los principios generales.

Los enunciados observacionales expresan datos experimentales: por ejemplo, el valor de la temperatura de un gas, las trayectorias de partículas o la composición química de una substancia. En cada estadio del desarrollo de una disciplina hay criterios operativos cuya aplicación permite decidir qué se admite como datos. La fiabilidad de una disciplina depende de su capacidad para establecer tales criterios con un fundamento sólido. Desde el punto de vista lógico, los enunciados observacionales son hipótesis. Su validez está en función de la fiabilidad de las técnicas utilizadas: microscopía electrónica, difracción de rayos X, detectores de partículas, telescopios, etc.

Las leyes experimentales relacionan conceptos observacionales. Desde una perspectiva lógica, una ley experimental es una generalización cuya validez no puede demostrarse: es, pues, una hipótesis. Pero puede comprobarse dentro del grado de aproximación permitido por los conceptos e instrumentos disponibles y en un ámbito determinado de condiciones del sistema. Así, la ley de los gases ideales se convierte en un enunciado verdadero o falso cuando se sustituyen la presión, el volumen y la temperatura por sus valores medidos; es válida para bajas presiones y en el supuesto de que las moléculas se comporten de modo aleatorio, tengan dimensiones despreciables, no ejerzan fuerzas de atracción y sus choques sean perfectamente elásticos. Por tanto, una ley experimental no es una traducción exacta de las leyes de la naturaleza, y el término "ley" es confuso. En realidad se trata de relaciones que se cumplen en condiciones determinadas. Cuando se formulan cuantitativamente es más exacto hablar de ecuaciones que de leyes: por ejemplo, la ley de los gases ideales es una ecuación de estado.

Los principios generales relacionan conceptos teóricos. Un ejemplo típico es el principio de conservación de la energía. Inicialmente se definió la energía cinética y se estableció su conservación en los choques de los cuerpos. Con objeto de salvar la conservación de la energía mecánica en las acciones a distancia se introdujo el concepto de energía potencial, relacionada con campos de fuerzas. Para los campos eléctricos se definió el potencial eléctrico. En el siglo XIX tomó cuerpo la idea de que las distintas formas de la energía eran comparables; en la década de 1840 Joule estableció que el calor y la energía mecánica eran intercambiables. James Prescott Joule presentó sus resultados a la British Association en 1843 sin demasiado éxito; se trataba, sin embargo, de experimentos cuidadosamente realizados e interpretados. ¿Por qué no fueron aceptados inmediatamente? Sin duda porque la equivalencia entre la energía mecánica, eléctrica y calorífica no se basa en puros hechos, sino en datos interpretados de acuerdo con principios teóricos. Finalmente se llegó a enunciar el principio de forma general, y se ha extendido también a los fenómenos atómicos y relativistas teniendo en cuenta la equivalencia entre masa y energía. Por tanto, si bien este principio se basa en leyes experimentales, propiamente es un postulado cuya validez se juzga en función de sus aplicaciones.

El principio de conservación de la energía nos conduce a un aspecto central de la fiabilidad, a saber: que la eficacia de las demostraciones no depende solamente de su rigor lógico, sino también de las sutilezas del método. Los principios de conservación son muy útiles porque nos permiten formular predicciones, ya que establecen que algunas cantidades no cambian durante los procesos. Por eso se ha recurrido en diversas ocasiones a la misma estratagema: introducir nuevos tipos de energía para salvar la validez del principio. Así han surgido magnitudes, como los potenciales, que desempeñan importantes funciones teó-

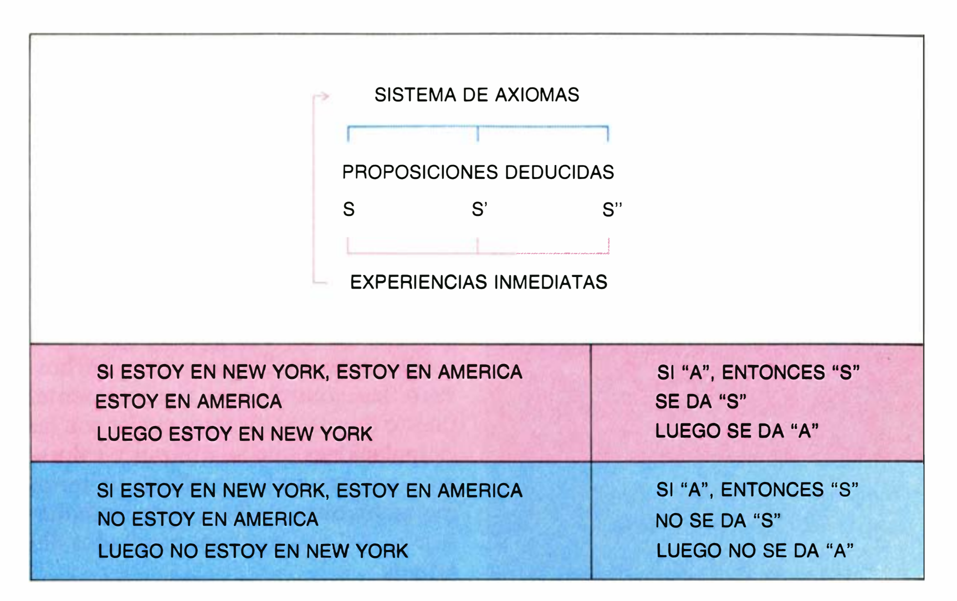


7. LA PRECISION DE LAS PREDICCIONES. El argumento más llamativo en favor de la fiabilidad de las teorías es la comprobación de predicciones nuevas y muy precisas. Según la teoría de la relatividad expuesta por Albert Einstein, cuando la luz emitida por una estrella pasa muy próxima al Sol, sufrirá una deflexión gravitatoria desviándose 1,75 segundos de arco. Einstein sugirió que se sometiera a prueba la predicción en un eclipse total, que permite fotografiar las estrellas visualmente próximas al Sol. Así podría compararse su posición con la observada cuando el Sol está lejano. Con ocasión del eclipse acontecido el 29 de mayo de 1919, cuya zona de totalidad iba de Brasil a Africa, la Royal Astronomical Society organizó dos expediciones, una a Sobral (Brasil) y otra a la isla Príncipe (golfo de Guinea). De vuelta a Inglaterra, los astrónomos estudiaron los resultados y el veredicto fue favorable: la media de las desviaciones observadas era 1,78 segundos. Esta comprobación significó un fuerte respaldo de la teoría y convirtió a Einstein en un personaje famoso. En la actualidad, pueden observarse este tipo de fenómenos en pleno día sin recurrir a eclipses, mediante radiotelescopios que captan radiaciones que caen fuera de la zona visible del espectro electromagnético.

ricas y reciben interpretación empírica.

En la física de partículas, parecía que el principio de conservación de la energía no se cumplía en la desintegración beta de núcleos radiactivos. Para salvar el principio se postuló la existencia de una nueva partícula, el neutrino, que es un componente básico de las teorías actuales. Cuando se buscan los posibles modos de desintegración de las partículas, una de las condiciones que se imponen es que se cumpla el principio.

Además, el principio se aplica de diferente manera según sea la naturaleza de los problemas. El primer principio de la termodinámica es una formulación del principio de conservación de la energía. Afirma que la variación de la energía interna de un sistema es igual a la diferencia entre el calor y el trabajo. Equivale a dar una definición de la energía interna, sobre cuya naturaleza no se formula ninguna hipótesis. Esto, que en apariencia es trivial, conduce a consecuencias de gran interés debido a que la energía interna, a diferencia del calor y del trabajo, es una función de estado y su diferencial es exacta. De ahí resultan relaciones matemáticas importantes.



8. VALIDEZ LOGICA DEL METODO HIPOTETICO-DEDUCTIVO. En un razonamiento condicional, la afirmación de la consecuencia, S, no permite afirmar el antecedente, A. El motivo es que A es condición suficiente pero no necesaria para que se dé S: puede darse S aunque no se dé la condición A. Por tanto, la comprobación de las proposiciones deducidas no basta para establecer la verdad de los axiomas de una teoría. En lógica, las teorías son hipótesis. En cambio, la falsedad de las consecuencias –basta una sola– implica la falsedad de alguna de las premisas. Se trata de la asimetría lógica entre verificación y falsación.

Estos ejemplos ponen de manifiesto que las demostraciones no consisten en simples inferencias lógicas por aplicación automática de normas. Imponemos condiciones como el principio de conservación de la energía, de la carga y del espín o el principio de exclusión que, si bien tienen una base teórica, no cuentan con garantías absolutas. Siempre que resulta útil –y lo es frecuentemente– introducimos hipótesis auxiliares y condiciones simplificadoras para obtener nuevas consecuencias. Establecemos convenciones matemáticas para obtener relaciones físicas; tal es el caso de las teorías de aforo (gauge), que proporcionan el armazón de las actuales teorías de campos. Una teoría gauge permite ajustar arbitrariamente el valor de ciertas magnitudes. Mediante recursos de este tipo, cuando disponemos de leyes que no cambian bajo una simetría global, podemos conseguir una simetría local si introducimos nuevos campos asociados a partículas; por ejemplo, el campo electromagnético se introduce como campo gauge cuya partícula de intercambio es el fotón. La renormalización es otro procedimiento matemático con repercusiones de interés físico; permite cancelar las cantidades infinitas que aparecen en la teoría de campos, corrigiendo parámetros básicos de la teoría tales como la masa y la carga del electrón: gracias a ello nos es dado compaginar los resultados experimentales con la electrodinámica cuántica, que es la teoría física más precisa de que disponemos.

Podría pensarse que las consideraciones anteriores debilitan la fiabilidad. Sin embargo, sucede lo contrario. Nos permiten comprender que la fiabilidad del método experimental se debe en buena parte a su enorme versatilidad. No tenemos inconveniente en introducir cuantos postulados necesitemos, porque no estamos obligados a confiar ciegamente en ellos. Los valoramos por sus consecuencias y los corregimos siempre que resulta oportuno. Así conseguimos demostraciones sutiles que nos ayudan a avanzar en nuestro conocimiento de aspectos inobservables de la naturaleza.

Cuando caracterizamos las teorías como sistemas hipotético-deductivos expresamos una verdad a medias. Si no añadiéramos nada más podría pensarse que se encuentran axiomatizadas de modo tal que, partiendo de unos postulados básicos, se deducen consecuencias mediante simples inferencias lógicas, como si las conclusiones estuvieran ya contenidas en los principios de la teoría. Por ejemplo, en la mecánica clásica se trataría de aplicar las leyes de Newton o las ecuaciones de Hamilton teniendo en cuenta las condiciones concretas de cada problema, y algo semejante ocurriría en cualquier otra disciplina.

Sin embargo, la realidad es otra. Las teorías factuales no suelen estar plenamente axiomatizadas. Esto se comprende fácilmente en cuanto echamos un vistazo a la historia, que nos dice que sólo se llega a teorías generales cuando se dispone de un conjunto de leyes experimentales, lo cual suele requerir muchos esfuerzos continuados a lo largo del tiempo. ¿Qué ocurre cuando al fin se formula una teoría consistente como la mecánica newtoniana, el electromagnetismo de James Clerk Maxwell o la biología molecular? Continúan descubriéndose nuevos efectos y se introducen nuevas explicaciones. Este proceso no tiene fin, ya que estamos interesados en problemas reales y por consiguiente introducimos los nuevos conocimientos aunque no exista una sistematización perfecta.

Además, una misma teoría admite diversas sistematizaciones y cada una tiene sus ventajas: basta pensar en la formulación ondulatoria de Schrödinger y en la matricial de Heisenberg para la mecánica cuántica. Sin duda, la sistematización desempeña funciones de gran interés. Ante todo permite formular explicaciones unitarias de fenómenos diversos, lo cual constituye una aspiración básica de la investigación. Además, la sistematización facilita la comprobación de las teorías, la obtención de nuevos resultados y la economía de los esfuerzos. Pero no es un fin en sí misma, solamente es un medio. Y nunca podemos afirmar que se ha alcanzado de manera definitiva.

Por estos motivos es difícil establecer la validez global de las teorías. Sin embargo, resulta más fácil valorar aspectos parciales, por ejemplo las leyes experimentales. Si bien es cierto que

estas leyes adquieren especial consistencia cuando se integran en sistemas teóricos, no lo es menos que tienen cierta autonomía. Por ejemplo, las leyes de la óptica geométrica se comprueban independientemente de la explicación física que se les dé.

En definitiva, las construcciones teóricas son hipótesis en el sentido siguiente: no se demuestran de modo concluyente mediante puros hechos. Pero las controlamos rigurosamente, puesto que especificamos cuáles son las estipulaciones que se utilizan y valoramos sus resultados mediante criterios intersubjetivos, válidos para cualquier sujeto. Así conseguimos resultados objetivos.

¿Qué relación existe entre la objetividad entendida como validez intersubjetiva y la verdad de las construcciones teóricas? Podemos referirnos a la verdad bajo tres aspectos: el contextual, el pragmático y el de correspondencia con la realidad.

Un enunciado es verdadero contextualmente cuando satisface las reglas de validez en un determinado contexto teórico. Por ejemplo, el teorema de Pitágoras es verdadero en la geometría euclídea. Una vez fijadas las estipulaciones de una teoría, débese afirmar la verdad de los enunciados que mediante ellas se demuestran: la equivalencia entre masa y energía en la relatividad, el significado del código genético en biología molecular, etc. Por tanto, la validez intersubjetiva de una construcción teórica garantiza su verdad contextual.

Desde el punto de vista pragmático, un enunciado es verdadero si permite resolver problemas prácticos. Ahora bien, para que un enunciado sea válido se requiere que supere de modo satisfactorio el control empírico, lo cual garantiza su verdad pragmática.

Pues bien, una vez que establecemos la verdad contextual y pragmática, queda fijada la correspondencia con la realidad. En efecto, los enunciados se refieren al modelo ideal definido en cada objetivación, y ese modelo se refiere a la realidad a través de un conjunto de criterios operativos. Por tanto, los enunciados que son válidos en el contexto de las condiciones teóricas y prácticas establecidas se corresponden con la realidad dentro de esos límites. Concretamente, los enunciados observacionales, las leyes experimentales y los principios generales formulan respectivamente datos, relaciones y condiciones obtenidos al considerar la realidad bajo determinadas perspectivas (objetivaciones). Se refieren a la realidad según modalidades diversas que determinamos considerando qué función desempeñan en la teoría y teniendo en cuenta si son fenomenológicos o representacionales. Por ejemplo, mediante experimentos de difracción demostramos que los electrones poseen propiedades ondulatorias, y el valor del campo asociado define la probabilidad de encontrar un electrón en condiciones determinadas: estos conocimientos se refieren a situaciones reales comprobadas y por tanto son verdaderos, pero lo son dentro de una objetivación concreta que no es la única posible.

Por consiguiente, alcanzamos conocimientos auténticos que al mismo tiempo son parciales, aproximativos y perfectibles. Parciales, porque sólo se refieren a los aspectos de la realidad que son accesibles a la objetivación correspondiente: cuando estudiamos un viviente desde el punto de vista de la biología molecular, la electricidad o la termodinámica conocemos aspectos parciales de una realidad compleja. Aproximativos, porque las construcciones teóricas se corresponden con la realidad dentro de un margen impuesto por las posibilidades teóricas y experimentales disponibles. Y por tanto perfectibles, ya que podemos conseguir objetivaciones más profundas y exactas. Además, reflejan la realidad mediante signos que requieren interpretación, o sea, a través del lenguaje de cada teoría.

Hemos dejado fuera de nuestra consideración los factores que suelen denominarse externos, tales como los condicionamientos sociológicos que influyen en la formulación de nuevas teorías y en su aceptación por parte de la comunidad científica. No subestimamos su importancia, pero los criterios internos ocupan el lugar central de la epistemología. Por vez primera en la historia, se está llegando a una valoración generalmente aceptada de la fiabilidad de la ciencia experimental. ¿Surgirán novedades que exijan ampliar nuestra perspectiva? Algunas áreas de investigación en biología y en las ciencias del conocimiento y la conducta plantean nuevas cuestiones epistemológicas de gran interés. Parece razonable aceptar que la fiabilidad tiene las mismas características básicas también en esos casos. En efecto, la enorme versatilidad del método experimental permite aplicar estrategias muy variadas para combinar lo teórico y lo empírico dentro de un plan general común, y ahí se encuentra la explicación de su fiabilidad.

Braquiópodos

Esos seres con apariencia de bivalvos se agrupan en dos clases. Una elige ambientes apropiados para una forma estable; otra adapta su forma y comportamiento al entorno local donde se desenvuelve

Joyce R. Richardson

Al examinar formaciones sedimentarias de la era Paleozoica (de entre 600 y 220 millones de años de antigüedad), los paleontólogos suelen encontrar pares de valvas, o conchas, fosilizadas que, a primera vista, recuerdan las de los moluscos bivalvos: almejas, mejillones o zamburiñas. Un análisis más detenido revela que, a diferencia de los moluscos, estas criaturas fosilizadas poseen valvas de distinto tamaño y una disposición muy diferente de los órganos internos. De hecho, son miembros de un *philum* distinto, denominado Brachiopoda. En épocas prehistóricas, los braquiópodos constituyeron una de las formas de vida más abundantes y variadas que existían en la tierra, habiéndose catalogado más de 30.000 especies a partir del registro fósil.

Hoy no abundan tanto los braquiópodos, y las especies actuales no se han estudiado en detalle, en parte porque la mayoría se encuentra en aguas muy profundas y porque ni su carne ni sus conchas tienen valor comercial. En contraste con la diversidad de las especies extintas, los tipos de braquiópodos actuales (unas 300 especies conocidas) muestran, en apariencia, una singular uniformidad. Muchos zoólogos han interpretado esa exigua diversidad como un signo de su incapacidad para competir con éxito con otros organismos marinos en la lucha evolutiva. Bajo este punto de vista, la mayoría de los braquiópodos que han logrado sobrevivir hasta nuestros días lo habrían conseguido gracias, principalmente, a la acción de fijarse sobre acantilados sumergidos en los ambientes litorales, hasta donde, literalmente, les habrían empujado los miembros de otros *phila* (como los moluscos) que ocupan fondos sedimentarios más alejados de la costa.

Sin embargo, si la longevidad puede considerarse un índice del éxito, los braquiópodos son los organismos actuales más afortunados. Así, por ejemplo, el género *Lingula* tiene un registro fósil que se extiende desde hace más de 500 millones de años hasta nuestros días sin solución de continuidad. Ni siquiera la importante ruptura ambiental que se produjo a finales del Paleozoico y que afectó al 90 por ciento de las especies marinas parece haberle influido. Los estudios recientemente realizados en océanos meridionales han puesto también de manifiesto la necesidad de revisar la opinión dominante según la cual los braquiópodos son un grupo evolutivamente estancado y al borde de la extinción. Hay especies, como las del género *Terebratella*, que pueden ocupar una amplia gama de ambientes. Tal capacidad puede atribuirse, en gran medida, a las propiedades especiales de su pedúnculo, un apéndice parecido a un tallo que es característico de casi todas las especies de braquiópodos vivos. Dichas propiedades dotan a esas especies de formas de vida bastante flexibles. Las especies del género *Terebratella* podrían, en potencia, generar las variadas faunas características de épocas pretéritas. De hecho, es muy posible que en los millones de años venideros el mundo sea testigo de un aumento del número de especies de braquiópodos, más que de una disminución de las mismas.

A pesar de las diferencias morfológicas que se advierten entre especies, todos los miembros del *philum* Brachiopoda comparten una fisiología común, que les permite habitar aguas oceánicas de profundidades, intensidades de corriente y temperaturas variables. Formas parecidas se han encontrado tanto en fondos blandos y fangosos, a 4000 metros de profundidad, como en las facies rocosas del intermareal. Tan amplia distribución ambiental resulta posible gracias a que los órganos respiratorios, alimentarios, digestivos, excretores y reproductores –todos ellos recogidos entre las dos valvas del braquiópodo– son funcionales en casi todos los ambientes marinos.

Los braquiópodos son micrófagos filtradores, esto es, ingieren diminutas partículas de alimento (tanto microorganismos como materia orgánica particulada) suspendidas en el agua circundante. Aunque ello obliga a filtrar volúmenes relativamente importantes de agua, la cantidad total de alimento que necesita un braquiópodo para subsistir es pequeña, pues su tasa metabólica es baja. De hecho, pueden sobrevivir más de dos años en agua de mar de la que se haya eliminado todas las partículas en suspensión. (En condiciones tan adversas no se reproducen, sin embargo.)

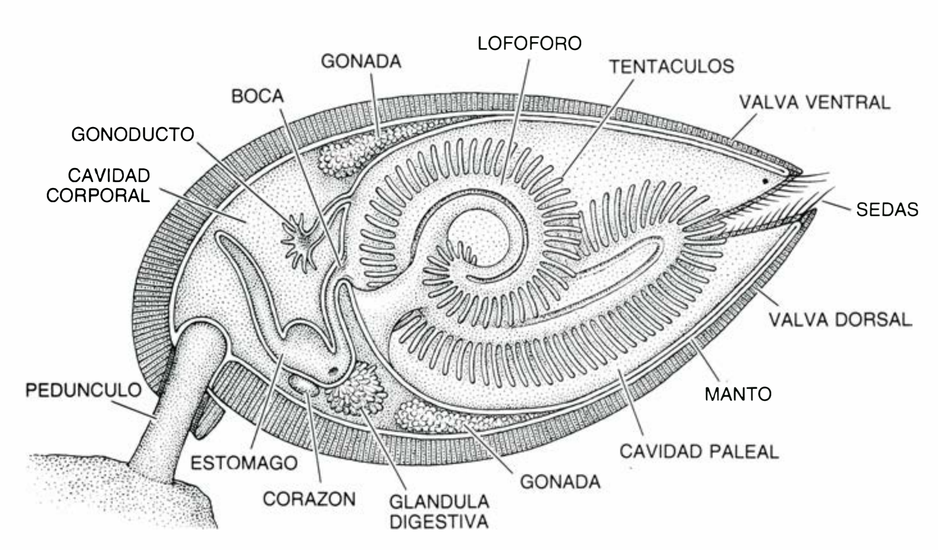
Muchos de los procesos necesarios para la vida tienen lugar en un órgano especial que realiza diversas funciones, el lofóforo, separado de la cavidad corporal del braquiópodo (donde se hallan los órganos internos) por una membrana (el manto). El lofóforo realiza funciones alimentarias, respiratorias y excretoras, y también puede servir como cámara incubadora y, probablemente, como órgano para el almacenamiento de grasa.

El lofóforo consta de dos brazos orlados de tentáculos ciliados que fuerzan la circulación del agua por la cavidad paleal, donde están situados. El flujo de agua facilita la respiración y dirige las pequeñas partículas alimentarias hacia la boca, que se encuentra próxima a la base del lofóforo. El alimento así capturado se compacta mediante una mucosidad, formando una masa que gira constantemente dentro del aparato digestivo, que es corto y de estructura sencilla. La ausencia de cualquier tipo de material fecal detectable sugiere que la digestión es muy eficaz.

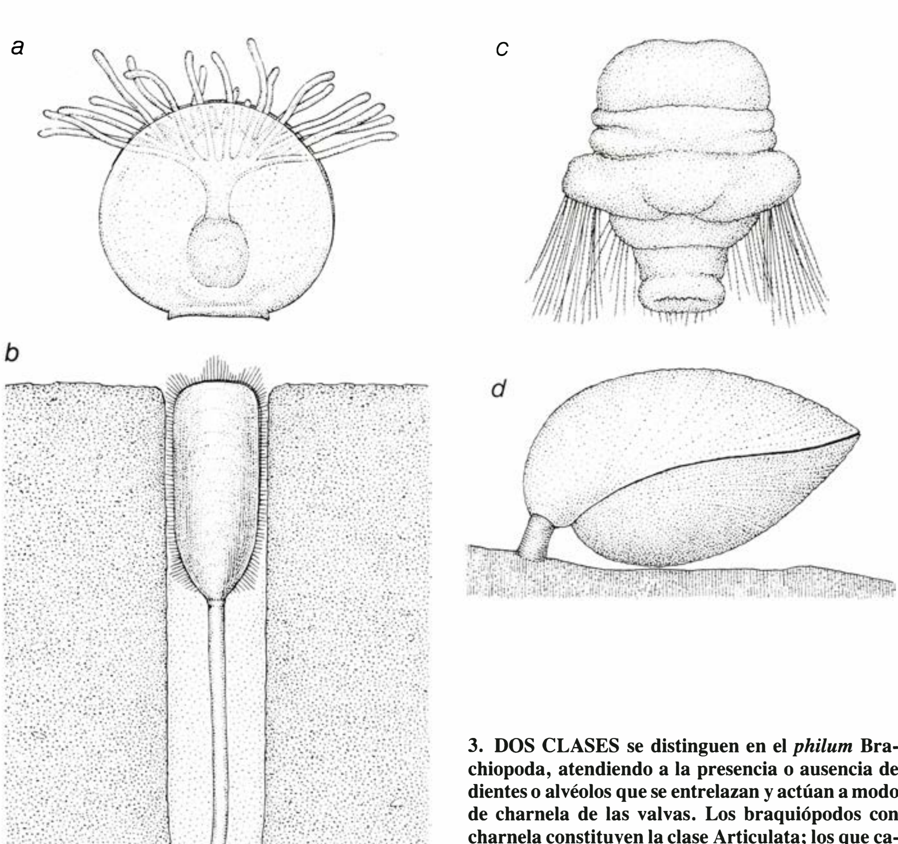
Junto con el aparato digestivo, los otros órganos importantes de la cavidad corporal son un pequeño corazón y un par de gonoductos, a través de los



1. LOS BRAQUIOPODOS se juzgaron en primera instancia moradores de acantilados rocosos, como es el caso de *Liothyrella uva* (*arriba*), especie que aquí aparece instalada a cinco metros de profundidad sobre una superficie rocosa del litoral de las islas Signy, en las Orcadas del Sur, cerca de la Antártida. Sin embargo, estudios más cuidadosos realizados en los océanos del hemisferio austral han revelado que pueden habitar multitud de ambientes. *Neothyris lenticularis* (*abajo*), por ejemplo, sobrevive entre los fragmentos de conchas de un fondo marino fangoso a 40 metros de profundidad, en aguas de la ensenada de Paterson, en las islas Stewart, Nueva Zelanda. Una fisiología común, unida a las adaptaciones del pedúnculo, el órgano en forma de tallo con el cual se fijan, permiten a esas criaturas subsistir en sustratos de características diferentes, en aguas de diversas profundidades, temperaturas e intensidades de corriente.



2. ANATOMIA GENERAL de un braquiópodo, en sección realizada a lo largo del plano de simetría del animal. El órgano más importante, el lofóforo, se encuentra en la cavidad paleal, separado, por el manto, de la cavidad corporal donde se hallan los demás órganos. Los movimientos de los tentáculos ciliados del lofóforo generan corrientes de agua entre las dos valvas, o conchas. Dichas corrientes internas capturan las partículas alimentarias suspendidas en el agua, dirigiéndolas hacia la boca, a la vez que expulsan de la cavidad paleal los productos de desecho. El lofóforo sirve igualmente de órgano respiratorio del braquiópodo, de cámara incubadora para las larvas y, con probabilidad, de órgano para el almacenamiento de grasa.



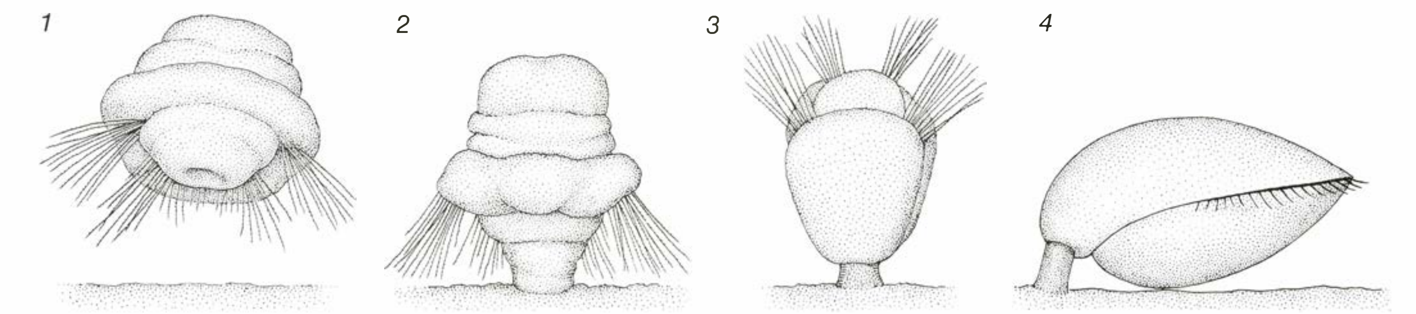
3. DOS CLASES se distinguen en el *philum* Brachiopoda, atendiendo a la presencia o ausencia de dientes o alvéolos que se entrelazan y actúan a modo de charnela de las valvas. Los braquiópodos con charnela constituyen la clase Articulata; los que carecen de ella, la clase Inarticulata. Las larvas de los braquiópodos inarticulados, como los del género *Lingula* (*a*), desarrollan tentáculos para la locomoción y órganos internos (visibles a través de sus valvas transparentes) para la alimentación y la digestión. Esas larvas nadan libremente durante períodos prolongados, mientras buscan el sustrato particular al que están adaptadas sus formas adultas (*b*). La madre libera las larvas de los articulados, como los del género *Terebratella* (*c*), antes de que se hayan desarrollado los órganos para la alimentación; su vida de nadadores libres es breve. Experimentan la metamorfosis para alcanzar la forma adulta (*d*) adheridas a cualquier sustrato sobre el que se hayan fijado inmediatamente después de su liberación.

cuales se excretan a la cavidad paleal los gametos masculinos o femeninos. El digestivo, de color verde, y las aberturas de los gonoductos, que son lobuladas y de color rojo oscuro, están fijados por membranas translúcidas a la cavidad corporal, repleta de líquido y cruzada por delgados músculos de color plateado rosáceo. La coloración y la disposición de esos órganos internos, junto con el lofóforo que está enrollado y delicadamente filamentado, crean un interior de singular belleza, que normalmente está oculto por las dos valvas de la concha del animal.

Raramente inquietan otros organismos marinos a esas criaturas, en parte porque sus tejidos blandos resultan inaccesibles a los potenciales depredadores (si exceptuamos, quizás, las estrellas de mar) cuando las valvas están cerradas y se retrae el pedúnculo. Colabora a que no constituyan un alimento solicitado el que su escasa carne posea un particular y desagradable sabor. (Según parece, a los peces les gusta tan poco como al autor y sus colegas: en experiencias de laboratorio y en la naturaleza, rechazan los tejidos frescos de braquiópodos aunque no se les ofrezca otra opción alimentaria.)

En los braquiópodos la reproducción es sexual; el macho expulsa el esperma al agua del mar y las corrientes de agua que capturan y mueven el alimento lo conducen hasta la hembra. Las larvas se incuban en el lofóforo antes de ser liberadas al medio exterior. (Que sepamos, los braquiópodos no muestran ningún tipo de comportamiento social. Sin embargo, como cualquier tendencia dispersante limitaría la transmisión del esperma a la hembra, los miembros de una población de braquiópodos tienden a vivir agrupados en "comunidades".)

En esencia, todos los braquiópodos son anatómica y fisiológicamente similares; ello no obstante, dentro del *philum* se distinguen dos clases: Articulata e Inarticulata. Como sus mismos nombres indican, a los Articulata pertenecen especies (como las del género *Terebratella*) cuyas valvas están unidas por dientes y alvéolos que se entrelazan formando una charnela. Por el contrario, los miembros de la clase Inarticulata (así las especies del género *Lingula*) carecen de esa charnela o bisagra, y las valvas de la concha están unidas sólo por músculos. Además de esa característica, otras distinguen a ambas clases, principalmente el comportamiento larvario y la naturaleza del pedúnculo.



4. CICLO VITAL de un braquiópodo articulado; comienza cuando la larva trilobulada, que nada libremente (*1*), se expulsa del lofóforo materno. La larva se fija pronto sobre los miembros de la población parental o cerca de ellos (*2*). La fijación va acompañada de la vinculación al sustrato del incipiente pedúnculo (que se desarrolla a partir del lóbulo posterior de la larva). Las sedas, o cerdas, que sobresalen de la cara inferior quizá colaboren en ese proceso. La metamorfosis sigue a la fijación, desarrollándose los órganos internos y el lofóforo a partir de uno de los lóbulos y, el manto y las valvas, del otro (*3*). En la forma adulta (*4*) el pedúnculo y su sustrato actúan conjuntamente a modo de apéndice único. Si la fijación al sustrato falla, el animal muere sin superar la fase larvaria.

Una larva de inarticulado es capaz de alimentarse y de mantenerse por sus propios medios durante períodos de seis semanas o más mientras busca un sustrato apropiado para fijarse. Cuando lo encuentra, el pedúnculo, todavía en formación, se desenrolla y emerge de entre las valvas de la larva para establecer conexión con la superficie adyacente. Por otra parte, la vida larvaria de un braquiópodo articulado es breve; la fijación (señalada por el comienzo del contacto del incipiente pedúnculo con el sustrato) precede a la metamorfosis y al desarrollo del sistema para capturar el alimento, del aparato digestivo y de otros sistemas de sustento. En ambos casos, la unión del pedúnculo con el sustrato es condición necesaria para que el braquiópodo alcance el estado adulto; si la fijación falla, el animal muere encontrándose todavía en estado larvario.

Los pedúnculos de los articulados varían en su forma y composición. Por el contrario, entre los braquiópodos inarticulados únicamente se conocen dos formas de pedúnculos: una corta, característica de las especies que viven sobre sustratos duros (los Acrotrétidos), y otra larga, propia de aquellas especies que viven sobre sedimentos poco consolidados (los Lingúlidos).

La causa que explicaría las limitadas formas del pedúnculo de los inarticulados puede hallarse en la pauta de desarrollo de ese órgano en la larva. La larva de un inarticulado tiene dos lóbulos. Uno origina el cuerpo del adulto y el pedúnculo; el otro, las valvas. El pedúnculo se desarrolla a partir de una yema sacciforme del cuerpo cuando el inarticulado se encuentra aún en estadio larvario y nada libremente. Por el contrario, la larva de los articulados presenta tres lóbulos; de uno de ellos se formará el pedúnculo en el momento de la fijación, antes de que los otros dos se hayan diferenciado en las valvas, el manto y los órganos internos. Así, el pedúnculo y los músculos pedunculares de un braquiópodo articulado se desarrollan como una unidad diferente e independiente del cuerpo.

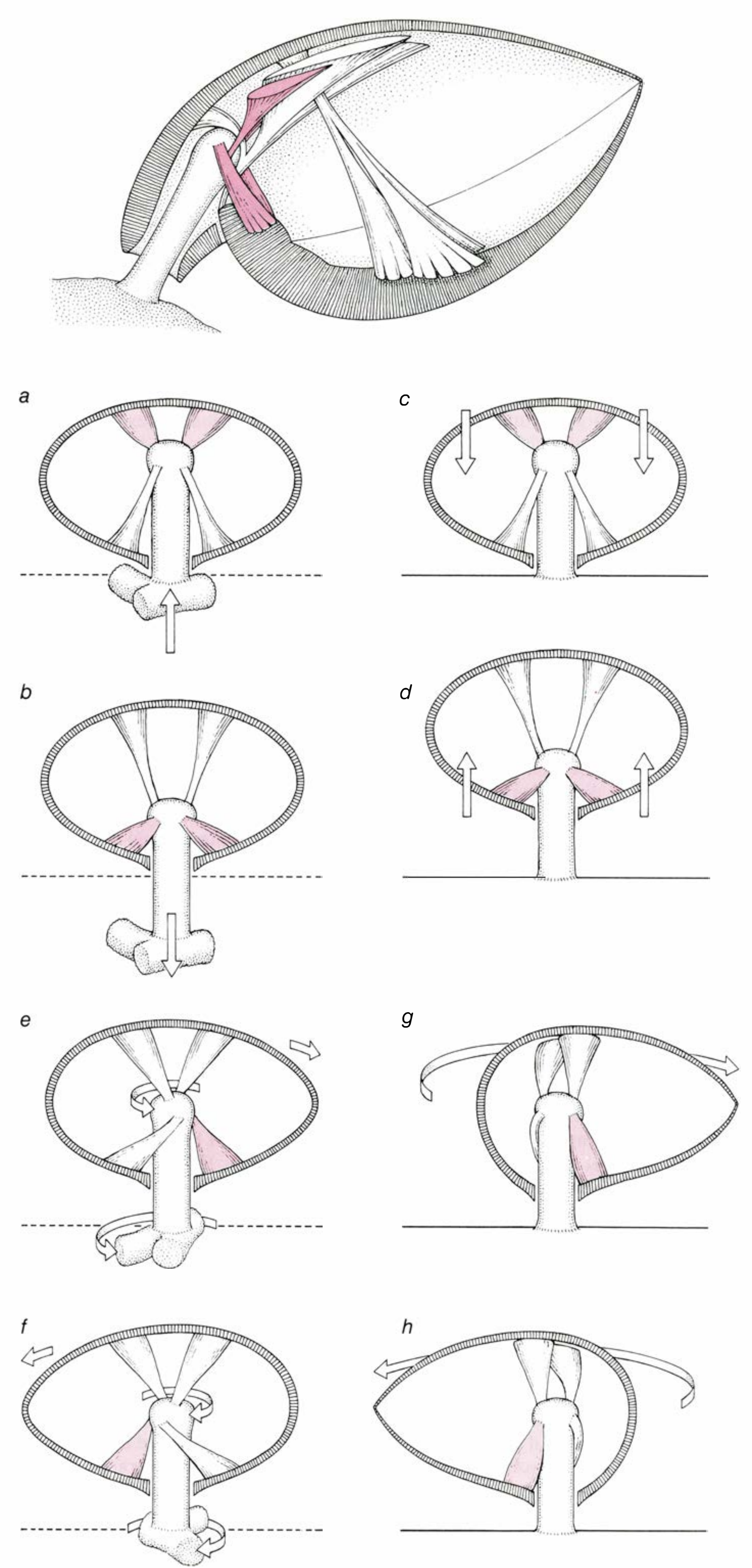
Se creyó en un principio que el pedúnculo constituía meramente un órgano de fijación, muy parecido al tallo y raíces de las plantas. Esta errónea concepción deriva de que los estudios sobre braquiópodos vivos en su ambiente natural se realizaron en rocas y arrecifes próximos a la orilla. En tales ambientes los braquiópodos parecen mostrar un tipo de vida sedentario. De ahí que se les considerara animales litorales permanentemente fijados a acantilados rocosos. Los individuos que se encontraron sueltos en el fondo del océano se juzgaron desprendidos accidentalmente de las rocas a las que debían mantenerse adheridos. Hasta que los biólogos marinos comenzaron a estudiar en más detalle las faunas bentónicas de los océanos del hemisferio austral no se aclaró la función principal del pedúnculo, que consiste en permitir la adaptación del animal al medio circundante, incluso en el fondo del mar.

A diferencia de otros órganos de locomoción más familiares, como pies, alas o aletas, el pedúnculo no es un apéndice libre. Desde el momento en que se inicia la fijación (en el estadio larvario) y en adelante, el pedúnculo y el sustrato se comportan como un único sistema, independientemente del tamaño del sustrato. El sistema motriz de los braquiópodos consta, por consiguiente, del pedúnculo, de un grupo de músculos que unen un extremo del pedúnculo a la cara interna de las valvas y de un ligamento que une el otro extremo del pedúnculo al sustrato.

Ejerciendo presión sobre la superficie de las valvas (como la que puede producirse por acumulación de sedimento) se estimula la contracción de los músculos pedunculares, lo que provoca el movimiento del braquiópodo o del pedúnculo y el sustrato, según sea la relación entre las masas del animal y del sustrato. En individuos fijados sobre sustratos grandes, el pedúnculo actúa a modo de pivote y la concha gira a su alrededor; en cambio, en braquiópodos fijados a pequeñas masas, las contracciones de los músculos pedunculares mueven el pedúnculo y, junto con él, el sustrato. Si la masa del braquiópodo es aproximadamente igual a la del sustrato, cualquiera de los dos, o ambos, pueden moverse; mandan entonces las condiciones inmediatas, en particular si se ha depositado más sedimento sobre uno que sobre otro. Independientemente de cuál sea la masa que se mueva, el resultado es el mismo: el sedimento se desprende de la superficie de la concha.

Aunque no hay diferencia en el funcionamiento del aparato peduncular de los braquiópodos que penden de los acantilados y de los que viven en el fondo, el modo de manifestarse las contracciones musculares y la amplitud del movimiento pueden diferir. En los primeros, que están fijados a un sustrato firme y rocoso, la actividad muscular hace que el braquiópodo gire de un lado a otro. En los segundos, que generalmente están adheridos a pedazos de grava o pequeños fragmentos de concha, el sistema pedúnculo-sustrato rota hacia un lado, provocando un ligero movimiento de torsión en dirección opuesta. Esos movimientos de torsión pueden ser débiles y parecer erráticos, pero resultan tan eficaces para impedir la acumulación de un exceso de sedimento sobre el braquiópodo como los vigorosos movimientos giratorios de los animales que están fijados sobre masas de sustrato grandes.

Con toda probabilidad, la razón de ser de esos movimientos tan peculiares es que impiden que el animal se entie-



rre y facilitan acceso al agua en cualquier medio que sea capaz de colonizar. Por tratarse de organismos filtradores, les resulta de vital importancia disponer de un libre acceso a aguas sin turbidez. Las observaciones realizadas en muchas especies vivas confirman que los movimientos que esparcen el sedimento provocan, automáticamente, una situación favorable para la alimentación en la interfase entre el agua y el sustrato.

En ese contexto, las especies capaces de mantener una postura estable que les permita alimentarse sobre cualquier tipo de sustrato se denominan generalistas. Sus pautas de conducta pueden variar tanto durante el ciclo vital de un mismo individuo como entre los diferentes miembros de una población. Otras especies, las especialistas, mantienen siempre el mismo comportamiento, el más adecuado para alcanzar la estabilidad alimentaria sólo en un limitado tipo de sustratos. Se distinguen anatómicamente estas especies por diversas adaptaciones de las valvas, pedúnculo y músculos pedunculares, que optimizan el movimiento sobre un determinado tipo de sustrato, pero que resultarían incompatibles con la superviviencia en cualquier otro tipo.

Así, por ejemplo, algunos braquiópodos articulados tienen valvas lastradas en la base, y se comportan como tentetiesos. Ese engrosamiento diferencial confiere a las valvas una orientación constante en los sedimentos blandos, lo que facilita los movimientos del animal en esos sustratos. Sin embargo, la adición de peso podría constituir una limitación del movimiento en sustratos grandes y sólidos. Por ese mismo motivo, el pedúnculo de otras formas especialistas ha tendido, en el

5. MUSCULOS PEDUNCULARES (*color oscuro*), que se advierten junto con otros músculos (que abren y cierran las valvas) en una sección posterior de un braquiópodo (*arriba*). La contracción emparejada (*color claro*) de los músculos pedunculares (que aquí se muestran en visión posterior, cortados diagonalmente) provoca el movimiento ascendente y descendente del pedúnculo y del sustrato (*a, b*) o de las valvas del braquiópodo (*c, d*), en función del tamaño del sustrato. Si el pedúnculo se fija a un sustrato pequeño, la contracción de uno de los pares inferiores de los músculos pedunculares hace girar al sistema integrado pedúnculo-sustrato, originando un débil movimiento giratorio de las valvas en sentido contrario (*e, f*). Si el pedúnculo está unido a un sustrato grande, el propio braquiópodo gira vigorosamente contrayendo los mismos músculos (*g, h*). Independientemente de si es el braquiópodo o el sustrato el que experimenta tan vigoroso movimiento, el efecto de torsión expulsa el sedimento que pudiera enterrar al animal. En virtud de esos sencillos movimientos, el braquiópodo se sitúa automáticamente en una posición favorable para alimentarse en la interfase entre el agua y el sustrato. Dibujos de Tom Prentiss.

transcurso del tiempo, a fusionarse con los músculos pedunculares, formando una poderosa unidad contráctil que cuenta con una amplia zona de fijación. Este tipo de configuración impide el movimiento del animal si no existe una superficie grande y dura que sirva de punto de apoyo. Los individuos de esas especies morirían sin llegar a adultos si se fijasen sobre sustratos poco consolidados. Las especies generalistas, por el contrario, tienden a manifestar menor variabilidad en la forma de las valvas y en la estructura del pedúnculo. Su morfología más limitada dota, no obstante, a estas especies de la capacidad de colonizar un amplio abanico de ambientes.

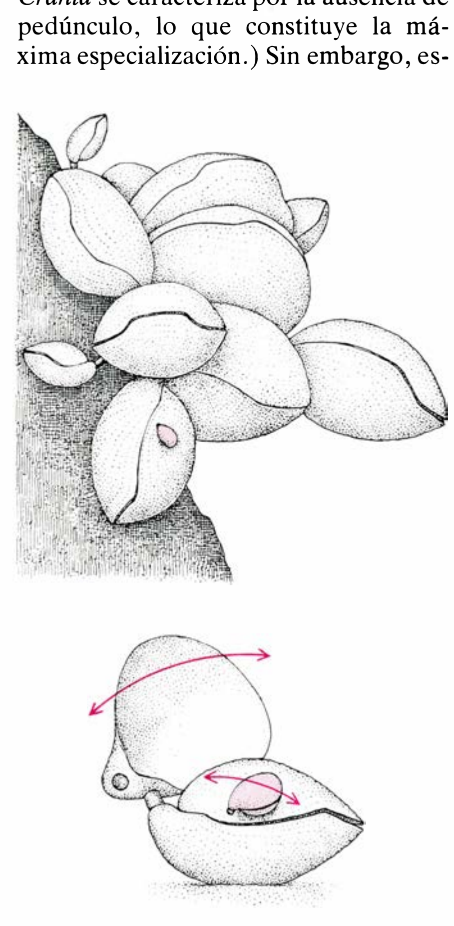
Del examen del registro fósil de los braquiópodos se desprende que la mayoría de sus líneas evolutivas han seguido la tendencia a incrementar la especialización, tendencia que culmina con la pérdida del pedúnculo. Cuando se carece de sistema peduncular, el organismo adulto es inmóvil, lo que le impide ajustar su posición con respecto al medio circundante. En tales casos se alcanza la estabilidad dotando a las valvas de formas especializadas y desarrollando engrosamientos en la superficie de las mismas.

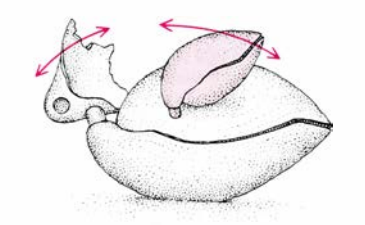
G. Arthur Cooper y Richard E. Grant, del Museo Nacional de los Estados Unidos, han documentado la diversidad de braquiópodos desde las eras más tempranas. Las abundantes faunas descubiertas por esos investigadores en las montañas de Glass, al oeste de Texas, comprenden numerosas formas de braquiópodos articulados que han perdido el pedúnculo y que, por tanto, son muy especializadas. Dos de las adaptaciones observadas en las especies apedunculadas extintas son la posesión de espinas con forma de espolón y la presencia de secrecciones cementantes, que les permiten fijarse firmemente a sustratos duros. Otras especies extintas contaron con el peso y con la forma rebordeada de sus valvas, así como con espinas de anclaje, para asegurar su estabilidad en sustratos blandos.

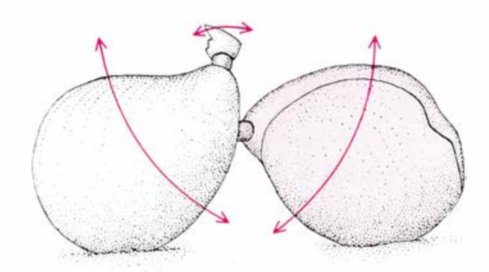
Actualmente, sin embargo, todos los braquiópodos articulados (salvo raras excepciones) tienen pedúnculos ¿Qué les ha sucedido a las numerosas especies de articulados sin pedúnculo que existían en el pasado? La respuesta revela la consecuencia de la especialización: su vulnerabilidad ante los cambios ambientales. La especialización que suele producirse gradualmente en respuesta a una prolongada colonización de determinado sustrato se apoya de modo decisivo en ese sustrato. Así, durante períodos de inestabilidad ambiental, cuando desaparece el sustrato concreto al que se ha adaptado y para el que se ha especializado una estirpe especialista, la población perece. Los generalistas están mejor dotados para independizarse de los cambios ambientales, puesto que no dependen de un sustrato determinado. La tasa de extinción de los grupos especialistas es función de la magnitud del cambio ambiental y del grado de especialización.

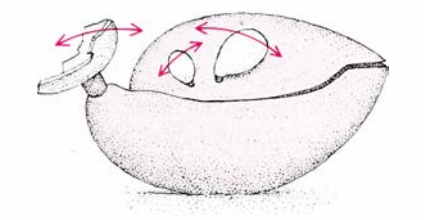
Para que se registre la extinción de formas especialistas no se requiere un desbaratamiento catastrófico del entorno, como ocurrió a finales del Paleozoico. Los estudios realizados en zonas geográficas locales han mostrado que esas desapariciones no son infrecuentes, y que cambios de pequeña escala geológica pueden resultar bastante devastadores. Finn Surlyk, del Servicio Geológico de Groenlandia, y Marianne Bagge Johansen, del Instituto de Geología Histórica y Paleontología de Copenhague, han documentado meticulosamente tal tipo de extinciones locales masivas a finales del Cretácico. Estos autores han puesto de manifiesto que muchas especies de braquiópodos adaptados a sustratos calcáreos, encontrados en aguas danesas, se extinguieron por un cambio de la sedimentación; registrado estratigráficamente, dicha alteración debióse a una capa de arcilla, que cubrió la caliza. De las 35 especies de braquiópodos halladas en los depósitos calcáreos, solamente seis se encontraron en la arcilla: todas eran generalistas.

Aunque la vulnerabilidad de los linajes especializados puede explicar las extinciones periódicas de los braquiópodos articulados, el análisis de la historia de las especies inarticuladas revela hechos que parecen contradecir esa hipótesis. Los braquiópodos inarticulados vivos están especializados; como mencioné anteriormente, se han adaptado tanto a superficies duras como a fangos blandos, pero no a ambos a la vez. (Así, el género acrocrétido *Crania* se caracteriza por la ausencia de pedúnculo, lo que constituye la máxima especialización.) Sin embargo, es-

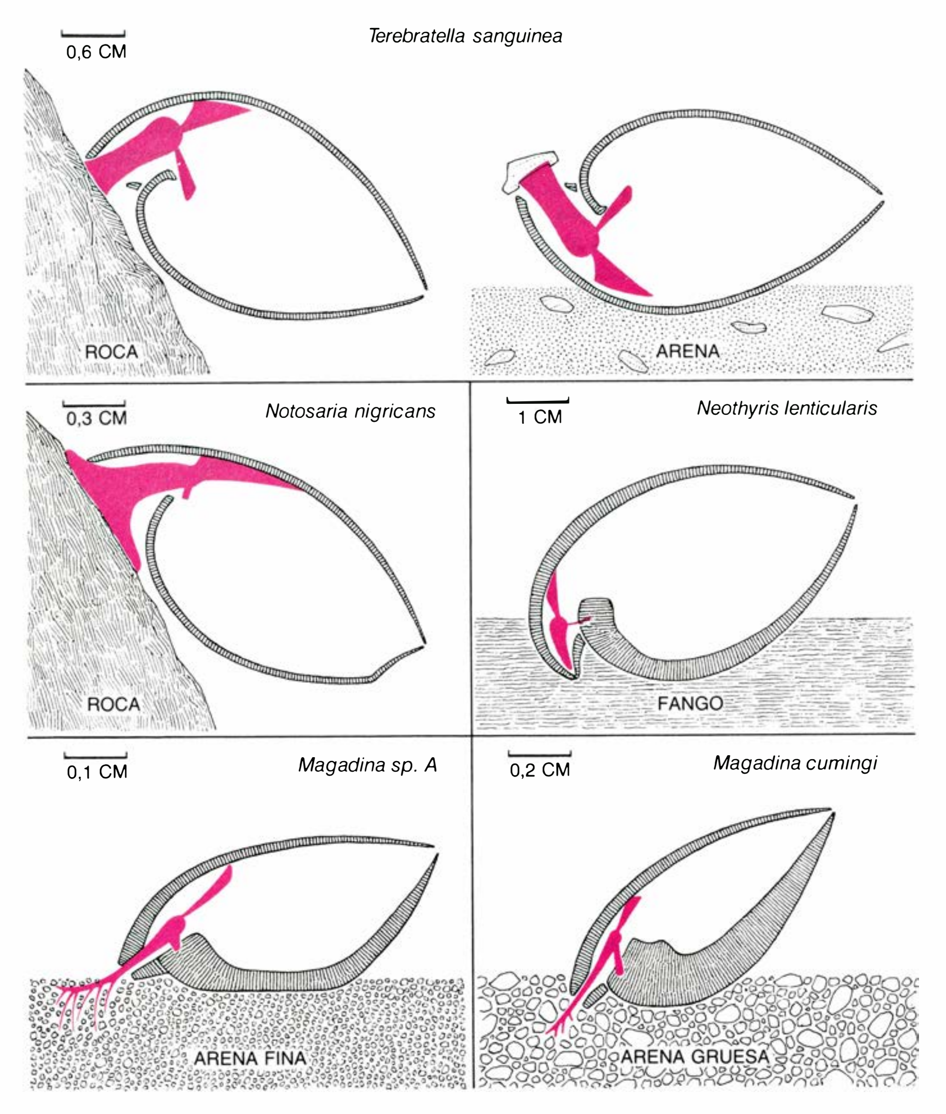








6. ADAPTABILIDAD de algunas especies de articulados. Se manifiesta por los cambios de comportamiento que un individuo de este tipo (*color*) presenta en el transcurso de su vida (*de arriba abajo*). Aunque el braquiópodo juvenil comience su desarrollo como un animal sedentario colgado de un acantilado, cuando su sustrato (en este caso un miembro de la población parental) se desprende de la pared del acantilado y cae, se adapta de inmediato al nuevo tipo de vida que se requiere para morar en el fondo. Durante el resto de su existencia, la criatura está sujeta a cambios de posición, determinados por los cambios de su propio tamaño (debido al crecimiento) y del sustrato (debido a la desintegración). Dado que el tamaño relativo entre el braquiópodo y el sustrato varía, el animal en desarrollo debe modificar su comportamiento: primero girará cuan grande es para librarse del sedimento, pero después hará girar el sustrato para obtener el mismo resultado. Cuando el braquiópodo y el sustrato adherido a él tienen masas aproximadamente iguales, puede moverse cualquiera de los dos; en ese caso, decidirá la cantidad de sedimento acumulado sobre cada uno. Las longitudes de las flechas indican la magnitud relativa de los movimientos del individuo y del sustrato.



7. ESPECIES GENERALISTAS Y ESPECIALISTAS de articulados, que se distinguen por características anatómicas tales como la forma de las valvas y la estructura del sistema peduncular (*color*). Las especies generalistas, así *Terebratella sanguinea*, pueden vivir pendiendo de los acantilados sobre el fondo. En cualquier situación, el movimiento generado por el sistema peduncular permite a los individuos de esa especie librarse del sedimento, sea cual fuere su orientación. En las formas especialistas el sistema peduncular y las valvas se han adaptado para acomodarse a sustratos particulares. En *Notosaria nigricans*, por ejemplo, los músculos pedunculares se han unido al pedúnculo formando una unidad contráctil robusta, con un área de fijación amplia. Tal tipo de adaptación permite a *N. nigricans* medrar sobre superficies rocosas extensas, pero el pedúnculo no resulta eficaz en superficies pequeñas e inestables. El pedúnculo de *Neothyris lenticularis*, en contraposición al de *Notosaria nigricans*, está atrofiado desde hace milenios, de manera que es inútil para la fijación en un sustrato extenso. Con todo, el tamaño, forma y grosor de la valva inferior permiten a la especie mantener una posición estable de alimentación en sedimentos fangosos. Otras dos formas de braquiópodos especialistas, *Magadina sp. A* y *M. cumingi*, también han desarrollado valvas con formas peculiares y pedúnculos que les permiten colonizar con éxito fondos marinos compuestos por arenas carbonatadas. Estas dos especies son las únicas en las que el pedúnculo empuja a través del sedimento que las recubre, actuando como un trinquete. Las larvas de estas especies se fijan a granos de arena o pequeños fragmentos de concha, pero las prolongaciones que parten del ápice del pedúnculo en el desarrollo posterior liberan al adulto del sustrato adherido. En períodos de cambios ambientales, las especies generalistas tienen mayor probabilidad de sobrevivir que las especialistas, porque no se han limitado a un tipo particular de sustrato.

tos organismos manifiestan una longevidad y continuidad en el registro fósil notables. Mientras que las especies de braquiópodos articulados han fluctuado entre períodos de especialización (dando lugar a la formación de nuevas especies) y de extinción, las especies de inarticulados han conservado las mismas formas especializadas y, presumiblemente, el mismo tipo de vida desde el pre-Paleozoico. Los linajes supervivientes de articulados e inarticulados deben haber ganado en resistencia ante los cambios ambientales pero, como lo atestiguan sus diferentes y sorprendentes historias evolutivas, ese vigor se ha alcanzado, por lo que se ve, de modo muy distinto en ambas clases.

Los inarticulados son especialistas, pero han sobrevivido durante millones de años porque sus larvas se bastan por sí solas, y además porque no se limitan a fijarse en las proximidades de la población parental. Si el ambiente local se torna inhóspito, las larvas de los inarticulados se desplazan de una zona a otra buscando el sustrato al que están adaptadas sus formas adultas.

Como ya se indicó, entre los articulados son las especies generalistas las que han sobrevivido: especies que medran por igual en cualquier tipo de sustrato. A diferencia de las larvas de las especies inarticuladas, las de los articulados se fijan en un lugar cualquiera, o cerca de la población parental, y fían en su propia capacidad adaptativa para superar los períodos de cambio ambiental. Por tanto, la continuidad de los braquiópodos articulados depende decisivamente de la supervivencia de suficientes especies generalistas. Lo cual queda asegurado si existe suficiente variedad de sustratos en el rango de dispersión larvario (como ocurre en las zonas costeras), de tal modo que no se produzca la colonización persistente de un sustrato uniforme y se impida la consiguiente especialización.

Ante esta panorámica de los factores que rigen la continuidad de las especies de los braquiópodos, no parece probable que el *philum* esté próximo a la extinción. Un estudio de los mares antárticos y subantárticos, realizado por Merril W. Foster, de la Universidad de Bradley, ha demostrado que los braquiópodos articulados son miembros habituales, y algunas veces dominantes, en las comunidades marinas de aquellas regiones. Estos organismos abundan también en las faunas de Sudamérica, Australia y Nueva Zelanda.

Algunos braquiópodos de aquellas aguas son generalistas; otros tienen los pedúnculos modificados en cierto grado, para medrar tanto sobre sustratos duros como blandos. De registrarse una estabilidad suficiente y de larga duración del área local que ocupan, podrían desarrollarse especies mejor adaptadas a condiciones particulares. Las tendencias que conducen a la pérdida del pedúnculo en sedimentos fangosos, y hacia su transformación en un apéndice libre en arenas carbonatadas, han configurado ya dos tipos. No obstante, la mayoría de los braquiópodos meridionales están poco modificados para vivir en ambientes muy específicos; en su mayoría muestran caracteres generalistas o son incipientes especialistas en proceso de colonización de nuevos ambientes. En absoluto parecen ofrecer las características de un grupo uniforme que se encamina hacia la extinción.

Contribución de Leonardo a la mecánica teórica

Un análisis detenido de su manera de pensar, expresada en los dibujos que aparecen en sus estudios sobre la ballesta, en particular, revela que sus ideas estaban relacionadas con la evolución de cuatro aspectos de la mecánica

Vernard Foley y Werner Soedel

Han afirmado algunos historiadores del Renacimiento que, pese a ser un genio en muchos campos, en realidad Leonardo da Vinci no hizo aportaciones valiosas a ciencias tan exactas como la mecánica teórica. A nuestro entender, sin embargo, cuando se presta especial atención al modo gráfico con que Leonardo expresa su pensamiento y a los manuscritos recientemente descubiertos, se puede concluir que sus aportaciones fueron a menudo sustanciales. Parece ser que su estudio sobre las armas, la ballesta en particular, resultó fundamental para que dirigiera su atención a esos temas. Las áreas que le interesaron, en su denominación moderna, fueron: el principio de la suma de velocidades, la ley de composición de fuerzas, el concepto de fibra neutra y el papel que desempeña el centro de gravedad en la conducta de un cuerpo en movimiento.

Parte de la polémica sobre si Leonardo trabajó realmente en el campo de las ciencias exactas arranca de la historia de sus cuadernos. Tras su muerte, éstos pasaron a manos de coleccionistas particulares, lo que dificultó durante mucho tiempo el acceso a los mismos. La publicación sistemática de sus cuadernos hubo de aguardar hasta finales del siglo XIX. A partir de entonces, y durante algún tiempo, se consideró a Leonardo inventor de casi todo, siglos antes de que sus ingenios tuvieran aplicación.

La fascinación por la figura de Leonardo también hizo despertar el interés por sus predecesores y contemporáneos. No tardaría mucho en descubrirse que Leonardo hizo uso mayoritario de esas fuentes, llegando incluso a veces a copiar minuciosamente sus ilustraciones. Todo ello condujo a pensar que Leonardo no creó nada original digno de mención.

Sin embargo, el descubrimiento en Madrid, hace unos 20 años, de dos nuevos manuscritos de Leonardo, conocidos por *Códices de Madrid*, empezó a invertir el sentido del péndulo. Ladislao Reti, de la Universidad de California en Los Angeles, el principal estudioso de esos textos, que cuenta con la inteligente ayuda en su trabajo de Bern Dibner, ingeniero e historiador, recalca que dichos manuscritos contribuyeron en gran medida a restaurar la fama de Leonardo como investigador de las leyes de la física. Para profundizar más en el tema conviene recordar que Leonardo empezó su formación como aprendiz de pintor y escultor, por lo que se valía en buena medida de los ojos y las manos. Creemos que la valoración que de él se haga como científico y teórico de la ingeniería ganará en riqueza, si ponemos menos énfasis en sus palabras y cálculos matemáticos y centramos nuestra atención en sus dibujos.

Empezaremos con un ejemplo que nos muestra a Leonardo luchando con problemas de diseño de armas, nunca resueltos del todo, que le hicieron adentrarse en el campo de la suma de velocidades y de la composición de fuerzas. Aunque las armas accionadas mediante pólvora evolucionaron rápidamente en su tiempo, los arqueros y piqueros desempeñaban todavía un papel predominante; de ahí que dedicara gran atención a armas tan antiguas como la ballesta. Se da el caso frecuente de que una técnica alcance su apogeo cuando empieza a presionarla otra técnica posterior, proceso que puede llevar a profundizar en principios científicos fundamentales.

El trabajo empírico precedente realizado con ballestas las había situado en un nivel óptimo de eficacia antes ya de la época de Leonardo. Por ejemplo, la saeta (la flecha de la ballesta) había casi doblado su eficacia aerodinámica respecto de las flechas tradicionales del arco común. También se había emprendido la búsqueda de principios fundamentales, como da a entender el dibujo, de un artista anónimo, conocido por *manuscrito de las guerras husitas*; refleja un intento de darle a la ballesta la forma de circunferencia. El tablero o cureña del arco resigue un diámetro. La nuez, o mecanismo de disparo que liberaba la cuerda, está situada en el centro. El arco ocupa un tercio de la circunferencia y, cuando la cuerda está en reposo, tras el disparo, bisecciona un radio.

En cierto sentido, ese dibujo representa una forma primitiva de teoría de la ingeniería, que es peor que no tener ninguna, pues pretende subordinar los requisitos del diseño funcional a una forma geométrica ideal. Mas no todos los resultados de dicha filosofía fueron negativos; incluso en el caso expuesto, se perfila un asomo de utilidad: el arco durará más si su curvatura es lo bastante uniforme. Si ello fuera imposible, los radios de la curvatura deberían coincidir entre sí suavemente. Proyectar el arco en forma de círculo nos lleva, al menos, a la esencia de esa idea.

En un intento de alejarse del diseño tradicional, Leonardo investigó la viabilidad de ideas tales como la de hacer el astil fijo y lanzar únicamente la punta de la flecha. Con ello parece comprender que la reducción de masa del proyectil facilita la consecución de una mayor velocidad inicial.

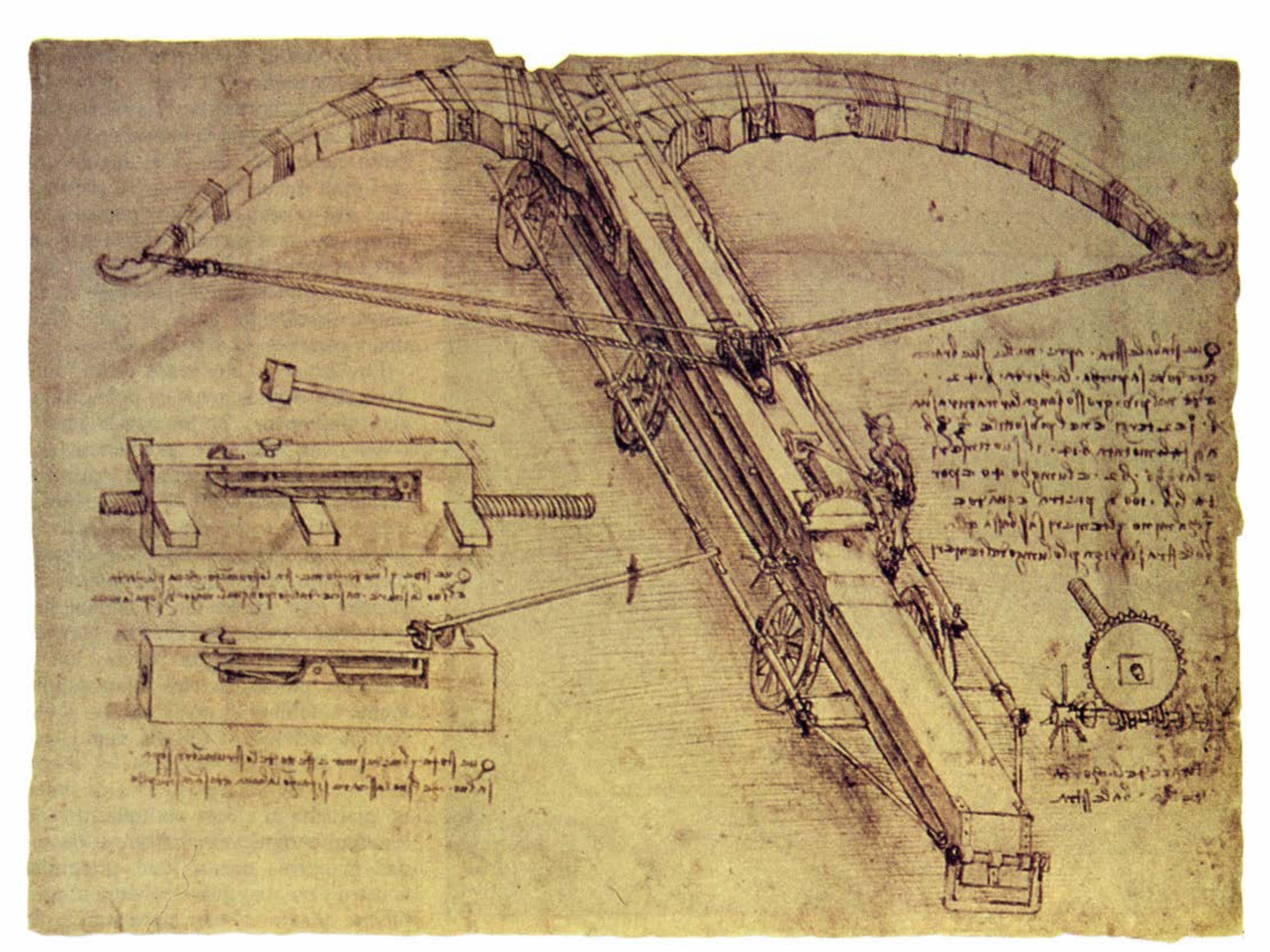
Algunos de sus diseños requerían ar-

cos múltiples, que actuaban simultáneamente en algunos casos y sucesivamente en otros. En su operación sucesiva, un arco pesado accionaría otro menor y más ligero, que accionaría a su vez a otro menor aún, etcétera. El último de la serie lanzaría la saeta. Leonardo pensó explícitamente sobre este proceso en términos de suma de velocidades. Dice, por ejemplo, que, para lanzar una saeta al mayor alcance, debería dispararse desde un caballo al galope y empujar el arma hacia delante en el momento de efectuar el disparo de la saeta. En realidad, el efecto combinado no aumentaría considerablemente la velocidad de la saeta. No obstante, las ideas de Leonardo representan los orígenes de la controversia sobre la posibilidad de añadir velocidades indefinidamente. Teóricos posteriores se inclinaron a pensar que dicho proceso era ilimitado, hasta que Einstein propuso que la velocidad de la luz constituía una barrera insuperable. A velocidades menores, el principio de la suma de velocidades sí funciona.

La ley de composición de fuerzas, conocida también por noción del polígono de fuerza, no obtuvo demostración hasta pasada la época de Leonardo. Pertenece a la rama de la mecánica que se ocupa de lo que sucede cuando interactúan dos o más fuerzas con ángulos distintos. Hoy, al abordar esos problemas, se dibujan rectángulos, paralelogramos o polígonos, y se resuelven las resultantes (las diagonales). Leonardo quizá se aventurara anteriormente en ese campo, cuando analizó las ballestas para resolver cierto problema de diseño. Se presenta éste en el proceso de ajuste ("tillering") que los constructores de arcos emplean al preparar las armas para su uso. ["Tillering" deriva de *tiller*, que en inglés significa cureña de ballesta. N.T.]

En la construcción de una ballesta resulta de vital importancia que cada brazo del arco adquiera idéntica fuerza. La desigualdad de fuerzas entre los brazos puede ocasionar el desvío de la saeta hacia los lados, sacándola de la ranura de disparo y perdiéndose, por tanto, la precisión del tiro. En el ajuste se comprueba la fuerza de los brazos. (Hoy, el ajuste se hace con todos los arcos, pero su nombre parece indicar que tuvo su origen en las ballestas.) Se cuelga el arma en una pared, con la cuerda horizontal y el arco boca arriba. Del centro de la cuerda se cuelgan pesas de tamaño diverso; cada pesa provoca en el arco un grado de flexión distinto, lo que permite comparar la resistencia de ambos brazos. Para ello, basta con observar si el punto central de la cuerda desciende en línea vertical a medida que se le añade peso.

La familiaridad de Leonardo con el proceso de ajuste o "tillering" quizá le impulsara a elaborar diagramas (hallados en el *códice de Madrid I*) que trazan el desplazamiento del arco en re-



1. ARCO PEDRERO GIGANTE, probablemente dibujado por Leonardo en relación con sus estudios sobre cómo tratar el aumento de tracción y compresión en un arco. El aparato se diseñó para lanzar piedras. Según lo dibujó Leonardo, la parte externa e interna de los brazos se construían de modo distinto, pues la externa debe soportar tracción y, la interna, compresión. Muestra, en particular, que el dorso de los brazos constaba de tacos, que sólo llegaban a tocarse cuando el arco alcanzaba su máxima tensión. El primer fracaso evidente de un arco hipertensado se halla en el dorso, por efecto de las fuerzas de compresión.

lación con el peso aplicado, poniendo especial énfasis en el punto central de la cuerda. Se percató de que la fuerza necesaria para tensar el arco era baja al comienzo y aumentaba gradualmente al moverse los brazos del arco. (Ello nos anticipa la ley de la fuerza elástica, formulada mucho más tarde por Robert Hooke: la fuerza es proporcional al desplazamiento.)

El término que empleó Leonardo para describir esa relación fue el de "piramidal", puesto que, al igual que los lados de una pirámide, comenzaba en un punto y crecía uniformemente con el desplazamiento del brazo del arco. Sin embargo, al representar la posición de la cuerda en función de la resistencia a la tracción, observó ciertas irregularidades. En primer lugar, aunque la fuerza está relacionada con el desplazamiento del brazo de manera lineal, no lo está así con el desplazamiento de la cuerda. Haciendo uso de las consecuencias de esa relación, parece haberle preocupado el que, en algunos arcos, la cuerda tendiera a moverse más rápidamente (al aplicar un incremento de peso determinado) justo después del disparo que cuando estaba a punto de alcanzar la posición normal de reposo.

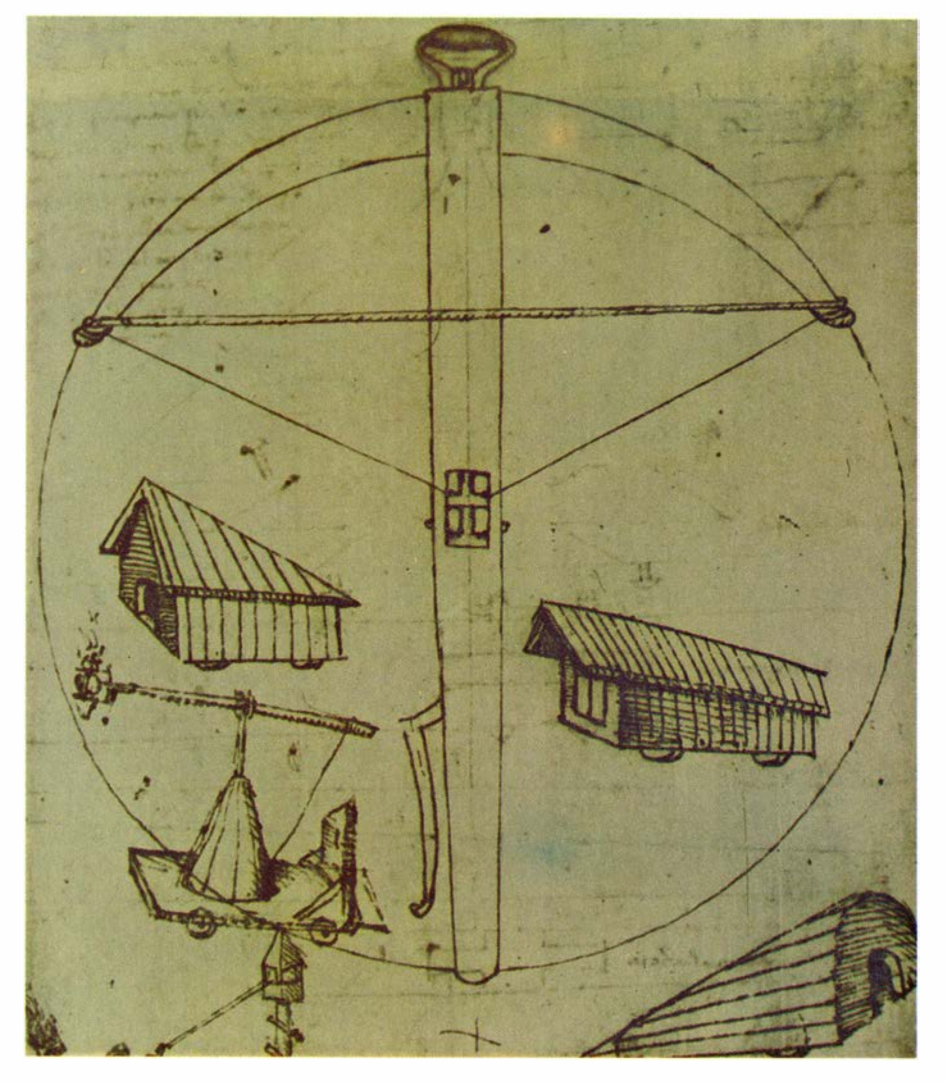
Quizás advirtiera esa irregularidad en arcos mal diseñados. Tal vez la deducción de Leonardo se basara en una conclusión errónea más que en mediciones, aun cuando a veces ofrece cifras. Sea como fuere, parece que el problema le llevó a profundizar en el diseño de la ballesta. La saeta que se aceleraba rápidamente al inicio del disparo, ¿adelantaba en realidad a la cuerda rezagada antes de que el arco se relajara por completo?

Al carecer de un conocimiento profundo sobre la inercia, la fuerza y la aceleración, quizá Leonardo no optara por una solución. En sus escritos se encuentran enunciados definitivos en uno y otro sentido. Su preocupación por el tema le·llevaría, sin embargo, a introducir nuevas modificaciones en el diseño de la ballesta, señal de que conocía, por intuición, lo que hoy llamamos principio de la composición de fuerzas.

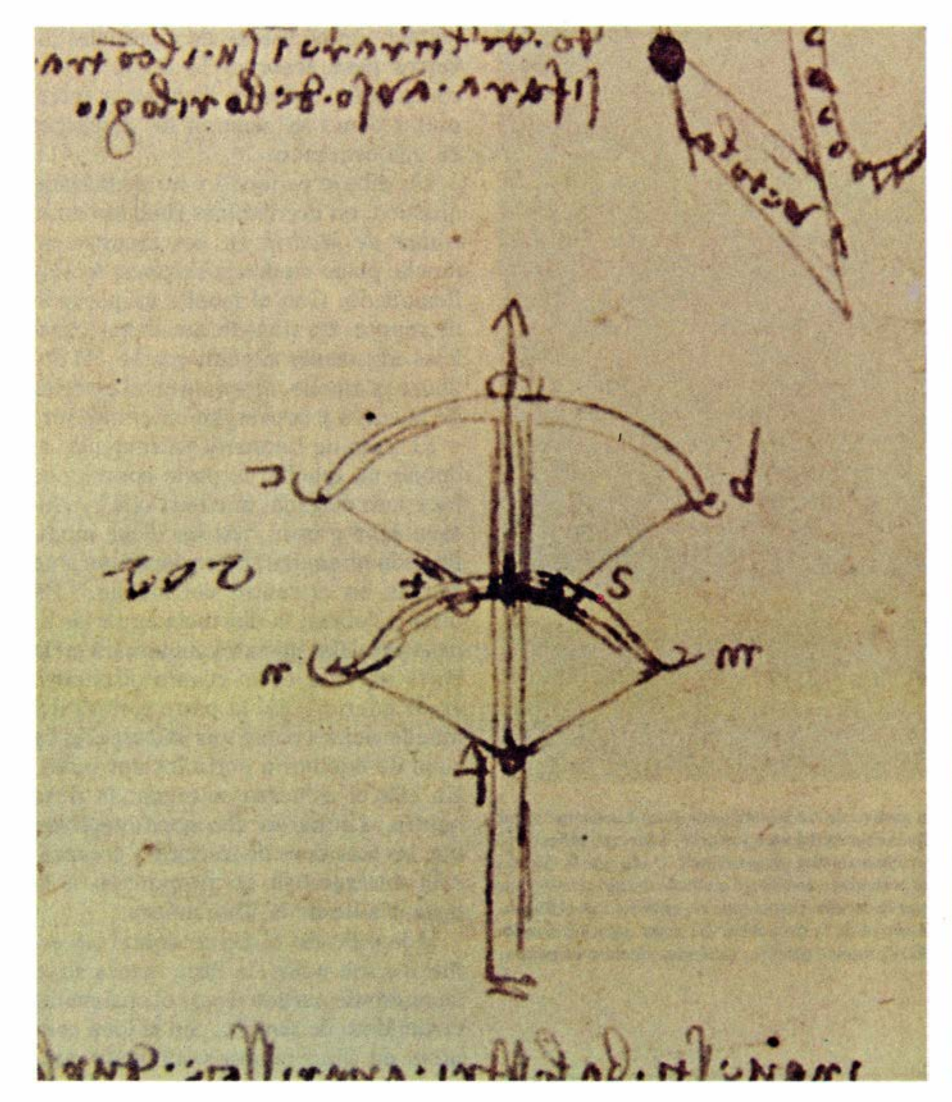
En su empeño por comprender y cuantificar el tema, Leonardo revoloteó por diversas soluciones, a veces apartándose considerablemente del objetivo. ¿Dispararía a doble distancia un arco que pesara el doble que otro? Si se determinara el peso de todas las saetas necesarias para alcanzar, unidas por sus extremos, la máxima distancia, ¿equivaldría en peso a la resistencia a la tracción del arco? A veces, como cuando se preguntaba si la vibración de la cuerda tras el disparo representaba una pérdida de la energía del arco, daba en el blanco.

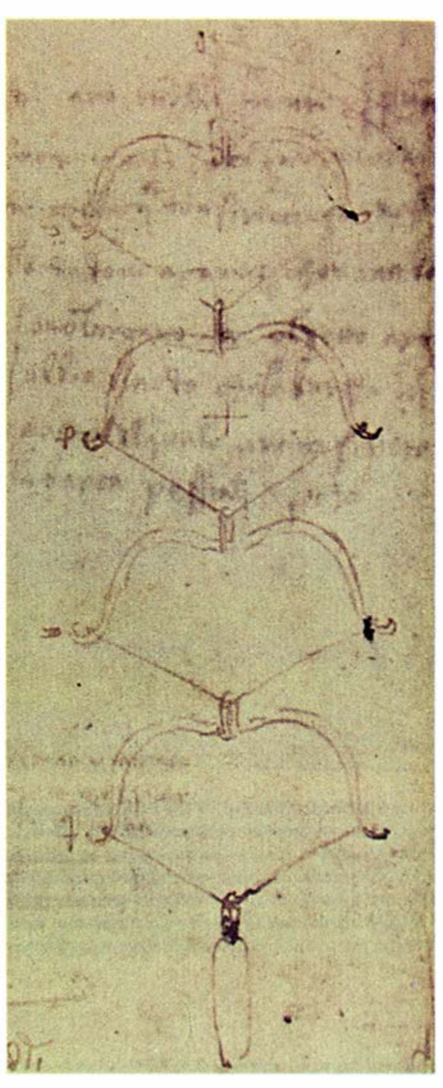
Con el tiempo, llegaría a una clara y simple observación (hallada en el *códice de Madrid I*) sobre la relación entre la resistencia del arco y el desplazamiento de la cuerda: "La fuerza motriz de la cuerda de la ballesta aumenta tanto cuanto disminuye el ángulo que se forma en el centro de la cuerda". Que esa observación no aparezca de nuevo en otros escritos quizás indique que Leonardo la diera por buena. Ciertamente, materializó el concepto en un nuevo diseño del arco, al que volvió una y otra vez: el arco de polea.

Los arqueros modernos están familiarizados con los arcos de polea (o arcos compuestos), en los que la cuerda rodea unas poleas. Se caracterizan por su gran velocidad de disparo y por una sustancial disminución de la resistencia a la tracción a medida que el arco se acerca a su máxima tensión; se conocen bien ambas propiedades. Leonardo no alcanzó ese grado de conocimiento, mas diseñó ballestas cuyas cuerdas rodeaban poleas. Según parece, en su caso las poleas se sujetaban sólidamente al tablero, y no se movían junto con los extremos del brazo, como ocurre con las poleas cruciales del diseño moderno. De ahí que su arco de polea no ejercería el efecto multiplicador de los arcos compuestos modernos. De todas maneras, parece que pretendió construir un arco que resolviera el problema ángulo-cuerda aumentando la fuerza de disparo por disminución del ángulo en el centro de la cuerda. Asimismo, intentó evitar el desperdicio de energía acarreado por un disparo prematuro de la saeta.



2. ENFOQUE TEORICO del diseño de una ballesta. Aparece en este dibujo de la alta Edad Media, de artista desconocido, que suele llamarse *manuscrito de las guerras husitas*. El arco se modela según una forma geométrica ideal: el círculo. Partes importantes del mecanismo se sitúan aquí en posiciones geométricas fundamentales. Por ejemplo, el mecanismo de disparo de la cuerda se encuentra en el centro del círculo. Se advierten proporciones sencillas; entre otras: que la cuerda del arco biseccione un radio. Tales enfoques ideales del diseño ingenieril representan uno de los puntos de partida de las investigaciones de Leonardo.





3. BALLESTA MULTIPLE, que viene a representar el interés de Leonardo en lo que hoy se denominaría suma de velocidades. Se trataba de ensamblar hasta cuatro arcos; cada uno de ellos accionaba el siguiente, hasta que el último disparaba la saeta, o flecha. La intuición de Leonardo era correcta, pues el aumento de la energía almacenada en el arco aumentaría la energía y alcance del proyectil. Sin embargo, no conocía la ley de conservación de la energía, por lo que no advirtió en su justa medida la pérdida energética que acarreaba el mover varios arcos y el proyectil. Resulta poco probable que el proyecto de Leonardo llegara jamás a ensayarse o que, caso de haberse puesto en práctica, tuviera algún éxito. (Ilustraciones cedidas por Pat Canganelli y la Biblioteca estatal de Baviera.)

En su diseño básico, sobre el tablero se monta un arco muy flexible. En algunas versiones el arco en tensión aparece casi como un anillo. La cuerda, sujeta a los extremos del arco, se tensa hacia el interior del mismo, hasta un par de poleas, montadas en la parte superior del tablero, cerca de la canal para la flecha. Una vez pasada la cuerda por ambas poleas se la hace retroceder hasta la nuez, donde coincide con la parte posterior de la saeta.

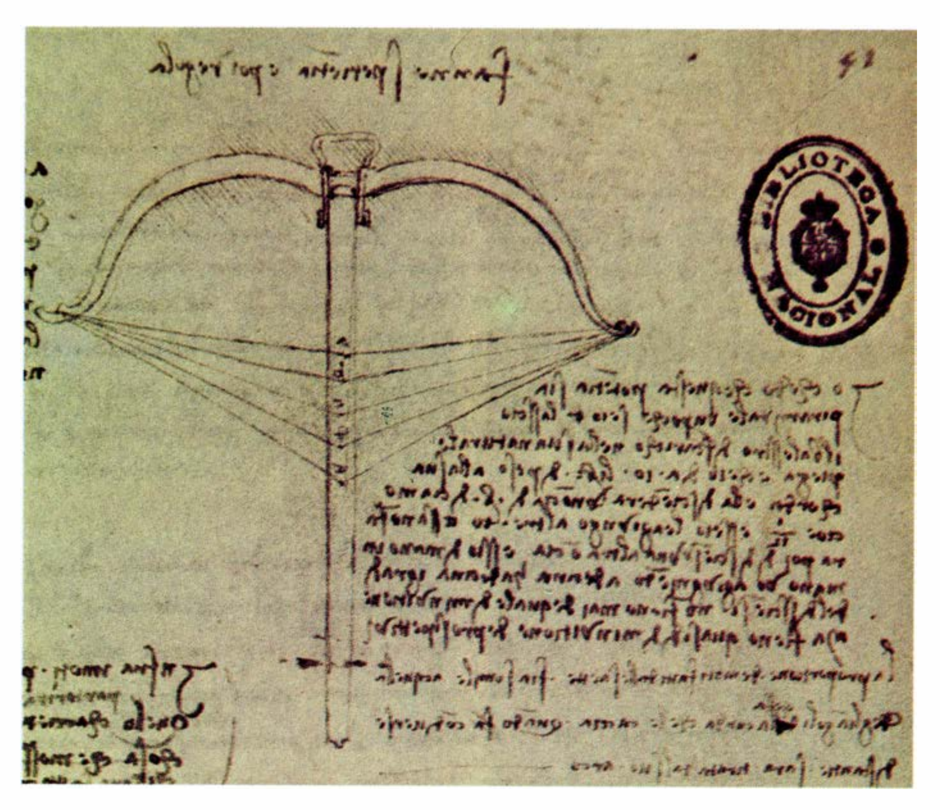
Parece que Leonardo nunca explicó la razón de ese diseño que, sin embargo, se ilustra repetidamente en sus dibujos junto a otra forma extraña de ballesta, a su vez extremadamente curvada, en la que la cuerda retrocede desde los extremos hasta la nuez formando una V muy destacada.

La explicación más plausible de ambos diseños es que quería minimizar el ángulo central de la cuerda para alcanzar mayor aceleración en el disparo. Probablemente, también hizo pasar la cuerda alrededor de las poleas para que el ángulo que subtendieran la cuerda y los brazos fuera de unos 90 grados el máximo tiempo posible. Su apreciación intuitiva de la ley de la composición de fuerzas le permitió proponer un nuevo diseño tan radical para un arma, utilizada ya tiempo atrás, de acuerdo con una relación cuantificada entre la energía almacenada en un arco y el movimiento de la cuerda. Sin lugar a dudas, tenía cierta idea del rendimiento mecánico de esa solución, e intentó mejorarla.

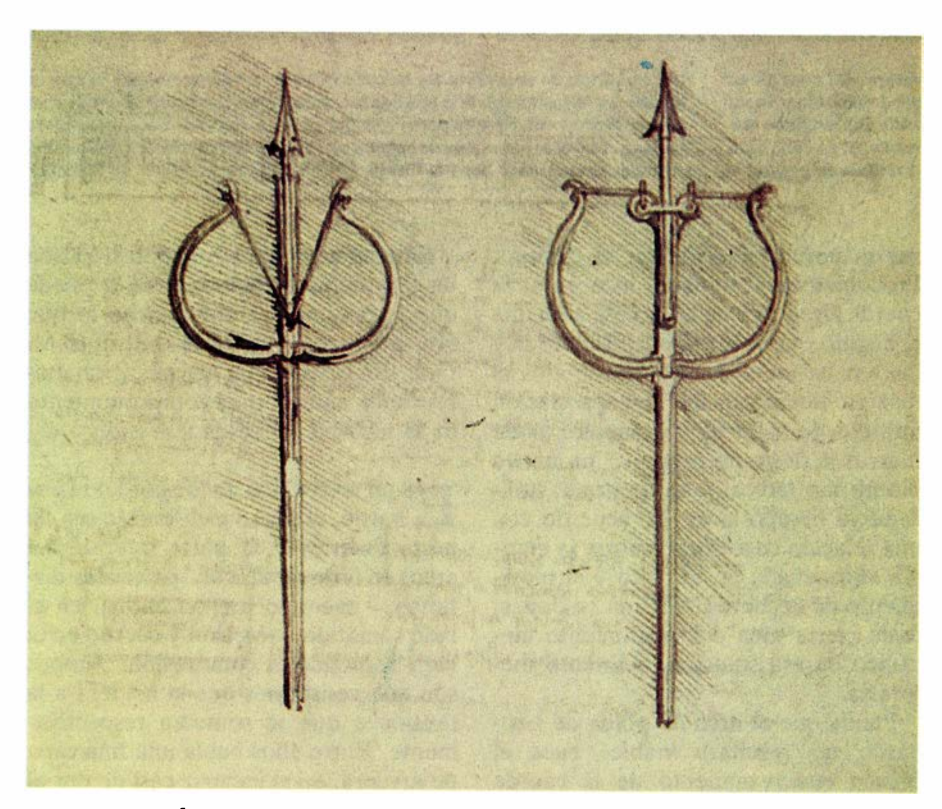
Puede que el arco de polea de Leonardo no resultara viable, pues el brusco enderezamiento de la cuerda podría haberlo sometido a una carga excesiva. Unicamente arcos de refinada estructura compuesta podrían resistir la extrema flexión que proponía.

Sin embargo, en su tiempo sí existía un tipo de arcos compuestos, y puede que le indujeran a trabajar en lo que hoy se conoce como fibra neutra. El estudio conllevaba una investigación más profunda aún sobre el comportamiento de la materia sometida a tensión.

En un arco típico de la época de Leonardo, el dorso y el seno (o sea, la parte exterior y la parte interior del arco) se fabricaban con materiales distintos, a menudo tendón animal en el lado sometido a tracción y cuerno en el lado sometido a compresión. Ambos son más resistentes que la madera a la tensión a que se someten respectivamente. Entre ellos había una fina capa de madera, en sí incapaz casi de dar al brazo rigidez alguna. Los brazos de tal arco pueden, al doblarse, superar los 180 grados. Leonardo no ignoraba del todo la elaboración de esos arcos, y el



4. LAS RELACIONES ENTRE FUERZAS constituyen motivo de cierta confusión para Leonardo. Aquí examina la relación entre el incremento de movimiento de la cuerda del arco y el peso, o fuerza, aplicada al tensar el mismo. A veces reconocía que la relación no era meramente proporcional. Dado que la cuerda almacenaba más energía en su máxima tensión que en otras posiciones, consideró que la flecha quizá se alejara de la cuerda antes de recibir toda la energía acumulada por la cuerda. Según parece, advirtió que el ángulo central formado por la cuerda constituía una medida decisiva de la capacidad del arma para transmitir energía, por lo que trató de maximizar el ángulo por medio de nuevos diseños, valiéndose incluso de poleas.



5. NUEVO DISEÑO DE BALLESTA. Parece que nunca anotó las razones que le llevaron a invertir el arco y hacer que el ángulo de la cuerda fuera tan agudo; en uno de los casos (*derecha*) añadió poleas. Textos relacionados sugieren que pretendía perfeccionar un arma que transmitiera la energía de modo más eficaz.

empleo, en el diseño, de materiales diversos para absorber la tracción y la compresión quizá le llevaran a interpretar cómo se generan los esfuerzos en una estructura.

Un dibujo pequeño y no demasiado artístico, en dos láminas (hallado en el *códice de Madrid I*), nos muestra un muelle plano en dos posiciones: recto y flexionado. Con el muelle en posición de reposo, ha trazado dos líneas paralelas adyacentes al punto medio. Al doblarse el muelle, divergen en el exterior de la curva y convergen en el interior.

El texto de Leonardo afirma que, al doblar un muelle, la parte convexa se hace más delgada, mientras que la cóncava gana grosor. "Al ser dicha modificación piramidal, no se dará nunca un cambio en el centro del muelle." En otras palabras, la distancia entre las líneas paralelas iniciales aumentará en la parte superior tanto cuanto disminuya en la inferior. Así la parte central del muelle viene a constituir una especie de zona de equilibrio entre los dos lados. En ella el esfuerzo se anula: la fibra neutra. Leonardo reconoció también que las tensiones de tracción y compresión aumentaban en proporción a la distancia desde la fibra neutra.

Indentificado el punto donde los esfuerzos son nulos, la fibra neutra sirve de punto de partida desde el cual medir el aumento de tensión. Sin la idea conjunta de fibra neutra y aumento proporcional de la tensión, resulta difícil, cuando no imposible (salvo con ayuda de un ordenador), predecir correctamente el aumento de esfuerzo, y, por tanto, diseñar, por ejemplo, una viga que resista. Un ordenador puede dividir las partes de una máquina o edificio en gran número de pequeños componentes y estimar los esfuerzos que se registran en cada uno de los mismos; ello no obstante, suele emplearse la noción de fibra neutra para que los programas resulten factibles. Así pues, aquí de nuevo Leonardo tocaba uno de los conceptos fundamentales de la ingeniería mecánica. (Carlo Zammatio, especialista en Leonardo, ha resaltado también la importancia de esos dos dibujitos.)

También en este tema, el observar los diseños de Leonardo nos permite reconstruir la génesis de la idea hasta la ballesta. Ejemplo de ello es su diseño de un gigantesco arco pedrero. El arco se tensa por medio de un molinete de tuerca y las piedras se lanzan desde una bolsa situada en el centro de la doble cuerda del arco. Ambas características, a mayor escala en dicho arco, en-

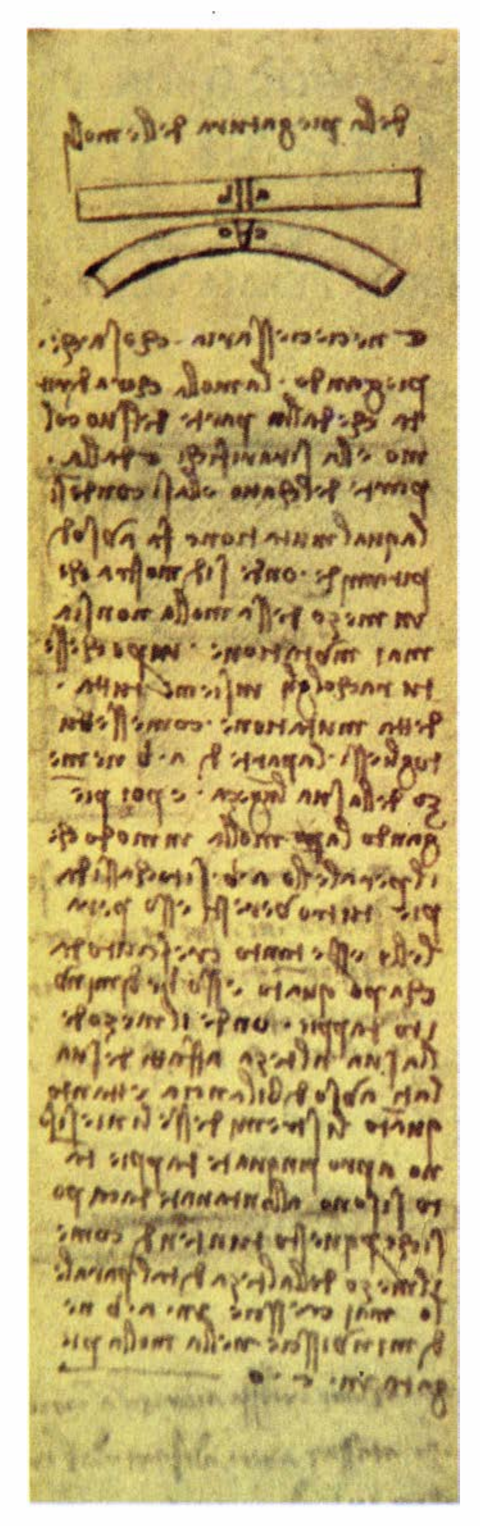
cuentran su origen en ballestas manuales. No obstante, Leonardo parece haberse dado cuenta de que tal ampliación del arco crearía problemas.

Sus diseños sobre el concepto de fibra neutra reflejan que había advertido el aumento proporcional de las tensiones del arco en razón directa del espesor, a igualdad del grado de flexión. Para evitar que alcanzaran un nivel crítico, rediseñó el arco gigante. La parte delantera, la que se somete a tracción, consta de un solo trozo de madera. El seno (sometido a compresión) se compone de diversos tacos, que se sujetan o se atan detrás de la porción frontal. Están modelados para que entren en contacto sólo cuando el arco esté en máxima tensión, o casi a punto de ello. Esos diseños demuestran la creencia de Leonardo de que las fuerzas de tracción y compresión debían tratarse por separado.

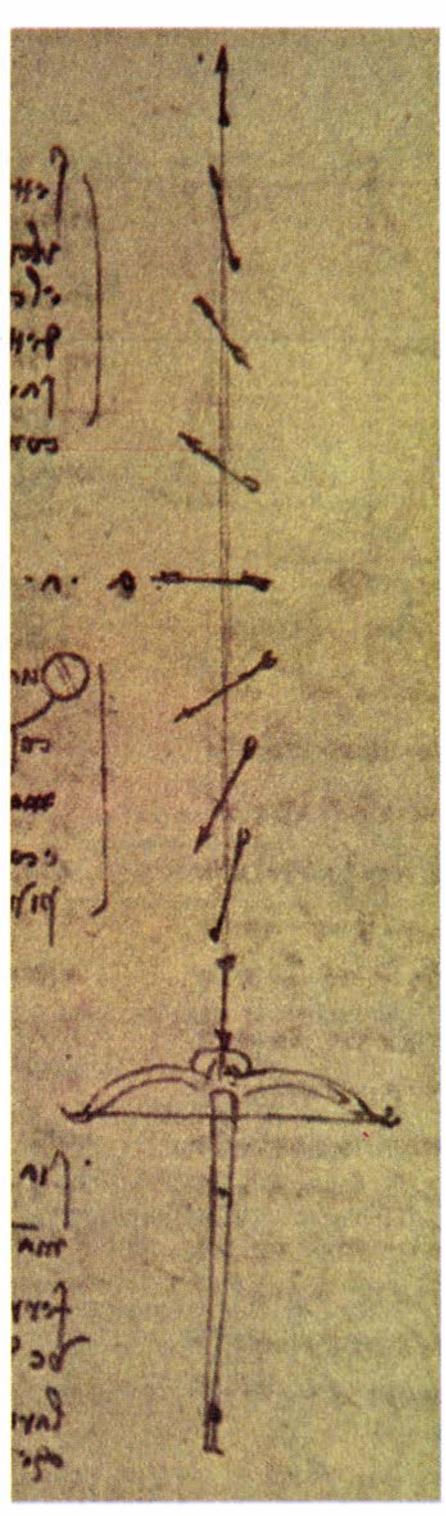
Nuestro último ejemplo, que trata del centro de gravedad, viene a sugerir que un estudio serio, por sencilla que sea la máquina, puede esbozar las líneas generales de principios fundamentales más profundos. A partir de otro pequeño dibujo en borrador (del *códice de Madrid I*), puede establecerse una conexión entre las reflexiones de Leonardo sobre la ballesta y sus posteriores teorías sobre el vuelo.

El dibujo nos muestra el disparo vertical de una ballesta. Al principio, la saeta se invierte, pues se había cargado hacia atrás en el arco (algo que Leonardo probablemente vio hacer a los ballesteros, durante los entrenamientos). Mientras vuela, debe dar vueltas hasta que la punta queda hacia delante. Al descender invertirá la secuencia. Leonardo afirma que el movimiento de la saeta describirá la misma trayectoria en ambos casos. “El centro del movimiento natural [debido a la gravedad] y el centro del movimiento accidental [debido a otras fuerzas] son uno y el mismo… El centro de gravedad de la flecha se hallará en el mismo centro durante su movimiento, ya sea accidental o natural.” Al comparar estas palabras con el dibujo, se observa que la saeta invertida rota en torno a su centro de gravedad mientras recupera su posición correcta de vuelo. Durante todo el tiempo el centro de gravedad se mueve a lo largo de la trayectoria de vuelo natural.

En otros términos, aquí Leonardo ha dado los primeros pasos para reducir el movimiento de una saeta o flecha al de un punto de masa que se desplaza a



6. FIBRA NEUTRA de una estructura bajo tensión; según parece, la descubrió el propio Leonardo. Sus bosquejos muestran (*arriba*) un muelle, o una viga, en posición recta y flexionada. Las líneas paralelas verticales que trazó en el centro del muelle horizontal divergen en el exterior y convergen en el interior cuando se dobla el muelle. El texto de Leonardo expone su convencimiento de que el centro de la viga no está sometido a ningún esfuerzo (fibra neutra) y que los esfuerzos aumentan a partir de ese punto en proporción a la distancia. Apoyados en esa interpretación de lo que hoy denominamos fibra neutra resultaba posible encontrar el nivel teórico de fallo en todo tipo de máquinas y construcciones.



7. CENTRO DE GRAVEDAD de un cuerpo en movimiento. Ocupó la atención de Leonardo en estos bocetos de una flecha disparada en vertical. En principio el dardo mira hacia atrás, pues se ha cargado invertido en el arco (lo que Leonardo probablemente vio hacer, divirtiéndose, a los ballesteros durante los entrenamientos). El texto indica que advirtió que la flecha rotaría alrededor de su centro de gravedad y que el centro seguiría la misma trayectoria que si la flecha se hubiera lanzado correctamente. El boceto parece constituir el primer esfuerzo por aplicar el concepto de centro de gravedad en la dinámica. Es un paso hacia los intentos de Newton por considerar los planetas como puntos de masa en movimiento.

cierta velocidad a lo largo de una línea predeterminada. Su dibujo es significativo, por tanto, en la historia de la dinámica rotatoria, pues simplifica lo bastante la situación para admitir tratamiento matemático. Es más, el esbozo constituye lo que, para nuestro conocimiento, es el primer intento de aplicar la idea del centro de gravedad en la dinámica. (Arquímedes había recurrido a él en situaciones estáticas.) Marshall Clagett, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, destacado estudioso de la mecánica medieval, ha corroborado nuestra opinión.

Antes del descubrimiento de los códices de Madrid se conocía otro boceto de Leonardo que ilustraba el centro de gravedad de un cuerpo en movimiento. En un cuaderno llamado *códice Forster II* se muestra un cubo que da vueltas mientras cae. El texto afirma que el centro de gravedad permanecerá en la línea de descenso. El bosquejo de la saeta de ballesta de Madrid parece ser el más antiguo de los dos, y bien pudiera señalar el punto de partida de las investigaciones teóricas de Leonardo sobre las condiciones del vuelo.

En el manuscrito *Sul Volo*, y en otros lugares, Leonardo subraya que el vuelo estable de un pájaro sólo se dará cuando el centro de gravedad del ave se encuentre situado delante de su centro de resistencia (el punto donde las presiones delantera y trasera son iguales). Dicho principio se considera hoy tan fundamental para los aviones o cohetes como lo era para los pájaros cuando lo aplicó Leonardo.

Hemos comprobado que no resulta difícil verificar experimentalmente el hallazgo de Leonardo. Escogimos un arco débil y una flecha pesada (para que la velocidad de la flecha fuera relativamente baja) y, para facilitar la observación, pusimos una banda de cinta adhesiva fluorescente de color naranja alrededor del punto de equilibrio de la flecha. Una punta pesada especial, con una muesca incisa para que pudiera dispararse la flecha con las plumas hacia delante, facilitaba el disparo y la observación, pues desplazaba el centro de gravedad hacia la punta. Conviene disparar sobre un fondo oscuro, como una arboleda, y de espaldas al sol. Por ser arqueros inexpertos, no todos los disparos mostraban el efecto del punto de masa, pero, en un buen número de casos, la flecha giraba alrededor del punto de equilibrio mientras el marcador naranja proseguía su descenso en una curva estable.

Juegos de ordenador

Decoración para la mente: imágenes casi repetitivas creadas por ordenador

A. K. Dewdney

El papel pintado ordinario, para decoración de interiores, se imprime con ayuda de un cilindro rotatorio, en el que está grabado un motivo. Al girar el cilindro, imprime el dibujo –siempre el mismo– una y otra vez. Sin embargo, sólo un ordenador puede reproducir ciertos motivos ricamente recamados, que he dado en llamar decoración para la mente. Tales motivos no se repiten a sí mismos; al menos, no exactamente. Antes bien, cada motivo se manifiesta continuamente en nuevos contextos y configuraciones, a izquierda y derecha, arriba y abajo. De una aparición a la siguiente, ¿qué se altera y qué se conserva?

Los coloridos retales de mi actual muestrario dan prueba de los resultados que pueden obtenerse por tres técnicas bien distintas. La dificultad de los programas de ordenador responsables de las imágenes oscila entre lo extremadamente simple y lo meramente fácil. Me han sido proporcionados por tres lectores: John E. Connett, de la Universidad de Minnesota, Barry Martin, de Birmingham, Inglaterra, y Tony D. Smith, de Essendon, Australia.

El programa de Connett se basa en el círculo, pero celebra la variedad de los diseños fundados en cuadrados. Esta aparente paradoja me compele a bautizarlo CÍRCULO^2. El programa, en dos palabras, se vale de la fórmula que define la circunferencia, a saber, $x^2 + y^2$, para asignar un color al punto de coordenadas x e y. Daré los detalles más adelante. En el ínterin, quizás el lector se desconcierte un poco (como me pasó a mí) al advertir que hay mucho más en ese decorado que un mero conjunto de círculos concéntricos. Específicamente, si retrocedemos y nos alejamos un poco de la pared, pueden aflorar también ante nuestra vista intrincadas pautas de delicados cuadros [*véase la figura 1*]. Algo hay de misterioso en todo ello.

Quizá no cause sorpresa alguna el saber que CÍRCULO^2 se inspiró en el conjunto de Mandelbrot, descrito en esta sección en octubre de 1985. Tal conjunto lo descubrió Benoit B. Mandelbrot, del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de IBM; el tumultuoso remolino de formas y colores que rodean al conjunto de Mandelbrot se basa en una única función matemática, que se aplica reiteradamente sobre su propia salida, para cada uno de los números complejos de una región del plano. En cuanto el valor absoluto de la iteración rebasa la cota 2, el número de iteraciones requeridas para alcanzar dicho valor determina el color del punto correspondiente.

Connett, no teniendo a su disposición un monitor en color, asignó el negro a los puntos que alcanzaban 2 tras un número par de iteraciones, y blanco a los puntos que lo hacían en número impar. Aparecieron así imágenes verosímiles del conjunto de Mandelbrot; ello indujo a Connett a explorar otras fórmulas. Optó por $x^2 + y^2$, eliminando, además, la iteración. Su programa explora sistemáticamente una región cuadriculada del plano; en cada punto (x,y) calcula el valor de la expresión $x^2 + y^2$ y trunca su valor, redondeándolo a un entero. Si tal entero es par, el punto (x,y) recibe el color negro; si es impar, el blanco (es decir, se deja tal cual estaba).

Mucho me temo que acabo de perder la mitad de mis lectores. Ya han comprendido el programa y han salido disparados hacia el ordenador más cercano. Así de sencillo es. En la notación algorítmica, CÍRCULO^2 consta de una sección de introducción de datos, seguida por un bucle doble:

entrada *verta, vertb*
entrada *lado*

para $i \leftarrow 1$ hasta 100
  para $j \leftarrow 1$ hasta 100
    $x \leftarrow verta + (lado \times i/100)$
    $y \leftarrow vertb + (lado \times j/100)$
    $z \leftarrow x^2 + y^2$
    $c \leftarrow \text{int}(z)$
    Si c es par, dibujar el punto (i,j)

El programa empieza haciendo que el ordenador solicite las coordenadas (*verta,vertb*) del ángulo inferior izquierdo del cuadrado a examinar. La variable *lado* determina el lado del cuadrado de interés. Por ejemplo, si el usuario da −15 y −20 como coordenadas del vértice, y 87 para el lado, el programa va dibujando una formación de 100 por 100 puntos, encajada en una región cuadrada del plano, de 87 unidades de lado, que tiene su vértice inferior izquierdo en el punto (−15,−20). En mi esbozo del programa he supuesto que los límites de la iteración van del 1 al 100, pero, lógicamente, será preciso ajustarlos, a fin de que el cuadrado encaje en los límites de funcionamiento del dispositivo de salida que vayamos a utilizar. En mi monitor, tales límites determinan en la pantalla un cuadrado más bien pequeño.

El bucle doble va repasando la cuadrícula, calculando, para cada par de índices (i,j), las coordenadas del punto (x,y) al que corresponde el par. El bucle procede entonces a elevar al cuadrado x e y, asigna la suma de los dos cuadrados a la variable z y redondea la suma por truncamiento. El máximo de los enteros que sean menores o iguales que dicha suma quedará registrado en la variable c. Si c es divisible por 2, se dibuja el punto (x,y), que presumiblemente será un punto de color en la pantalla, o un cuadradito negro, si se usa la impresora. En el caso de que c sea impar, el punto se deja en blanco, es decir, no se dibuja o imprime nada.

Los lectores que deseen recrear los motivos decorativos de Connett no tienen que preocuparse demasiado en programar correctamente los colores, pues la mayoría de ellos son igualmente llamativos "en negativo", intercambiando los colores. En realidad, cabe perfectamente utilizar más de dos colores: en lugar de determinar si c es par o impar, se divide entre el número de colores que deseemos utilizar. Cada uno de los restos de la división puede hacerse corresponder con un color. Por ejemplo, para generar las imágenes superior, central e inferior de la figura 1 se eligieron dos, tres y cuatro colores, respectivamente.

Cuanto más pequeño sea el cuadrado objeto de examen, tanto más cercano parece estar el cuadrado al observador, y tanto mayor es la ampliación de la imagen de CÍRCULO^2. Sin embargo, a diferencia del procedimiento para colorear entornos del conjunto de Mandelbrot, el programa de Connett no genera una regresión infinita de motivos progresivamente más pequeños. A

grandes ampliaciones, en torno al origen (0,0) aparece un conjunto de círculos concéntricos. Con ampliaciones aún mayores resulta un gran disco negro en el centro de la pantalla, pues el valor de truncamiento correspondiente a cada uno de los puntos del disco es 0. Después, toda la pantalla es negrura.

Podemos apreciar mejor la belleza de los motivos decorativos de Connett reduciendo la ampliación, o sea, alejándonos de la pared. Los círculos concéntricos se disuelven y confunden en una desconcertante configuración de círculos primarios y secundarios, que recuerdan un *moiré*. Al reducir más y más la ampliación, surgen como por arte de magia nuevos motivos decorativos, aparentemente distintos. ¿No estará acechándonos aquí una regresión infinita? Parece una pregunta vejatoria, pero espero que los lectores arrojen algo de luz sobre la cuestión antes de que, dentro de tres meses, dé a conocer las respuestas más interesantes.

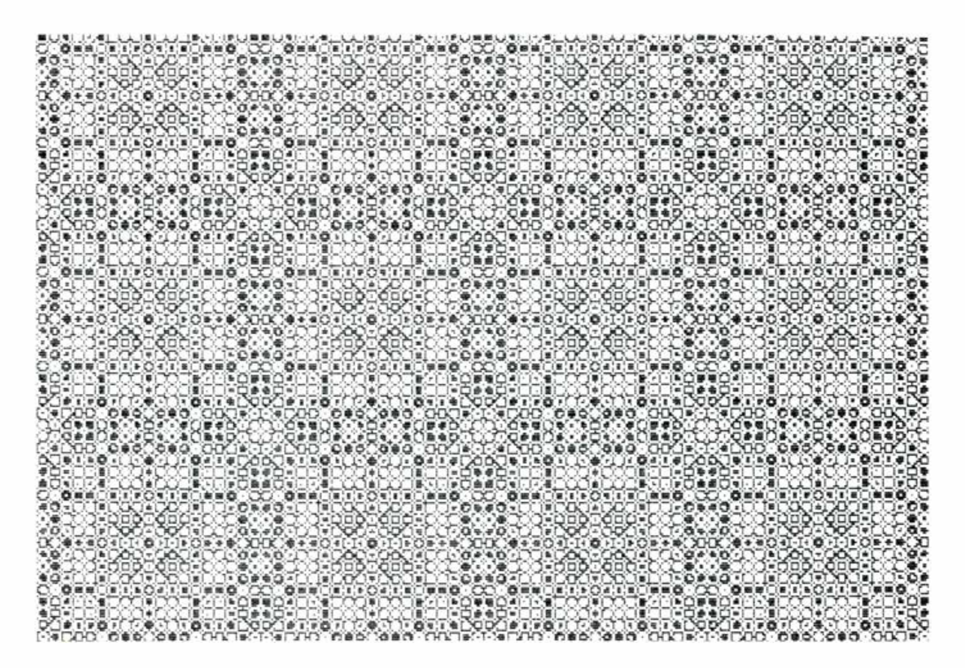
En la Universidad de Aston, Birmingham, también Barry Martin se sintió inspirado por el conjunto de Mandelbrot. Adoptó la idea de Mandelbrot de ir aplicando reiteradamente una misma fórmula, partiendo de una semilla numérica; pero la semejanza termina ahí. Mientras que los diseños del conjunto de Mandelbrot emergen de la transformación de una variable compleja, los motivos decorativos de Martin se basan en iteraciones de números reales ordinarios. Además, las simientes numéricas del conjunto de Mandelbrot son los puntos –el número de los cuales es infinito– que se encuentran en una determinada región del plano complejo. En cambio, el programa de Martin hace aflorar sus motivos a partir de una única semilla.

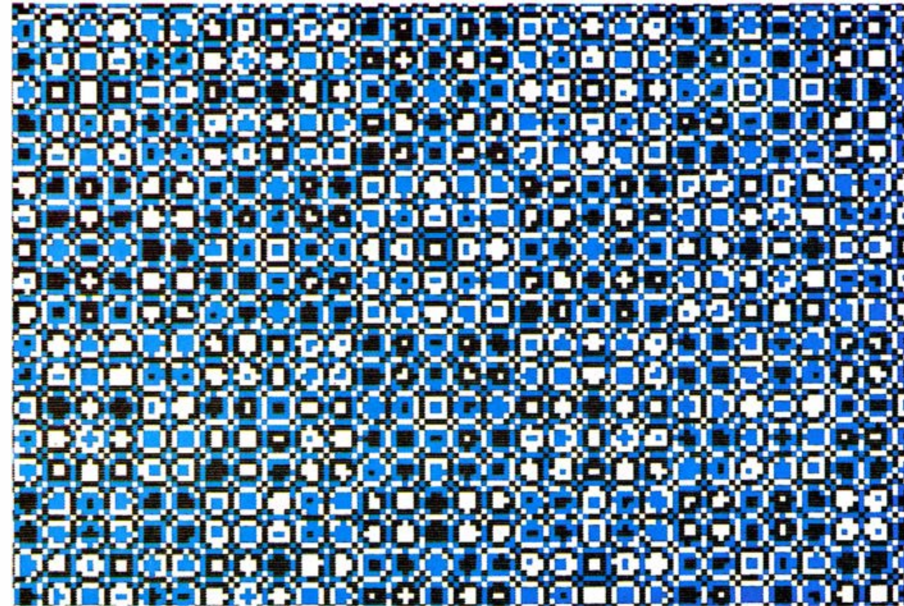
Por ejemplo, Martin sugiere que se ensayen el siguiente par de fórmulas, capaces de generar imágenes polícromas, sumamente detalladas, muy bellas y sorprendentes [*véase la portada de este número y las figuras 3 y 4*].

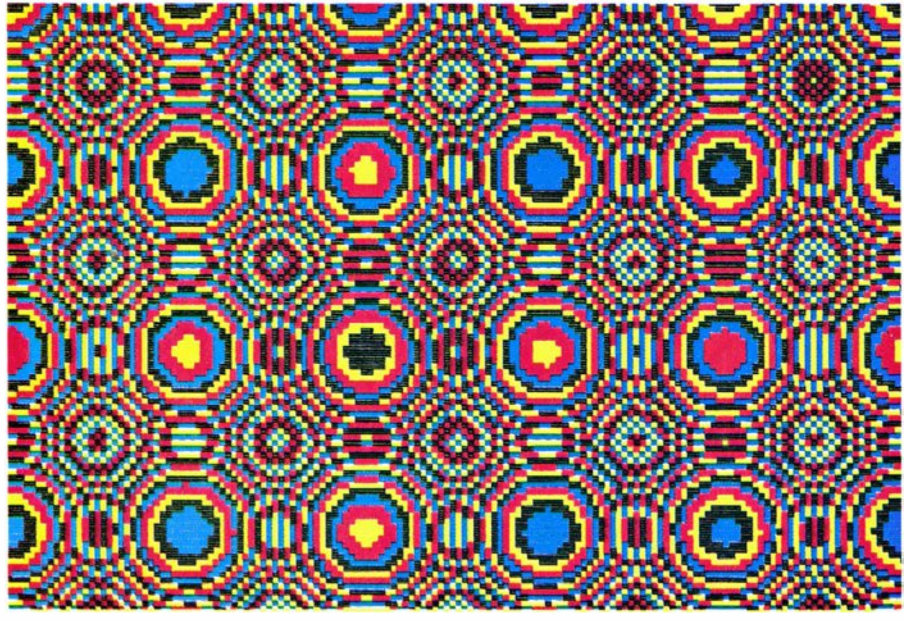
$$x \leftarrow y - \text{signo}(x) \times [\text{abs}(b \times x - c)]^{1/2}$$
$$y \leftarrow a - x$$

En la expresión anterior, la función signo(x) toma el valor 1 o el −1, en función de que x sea positivo o negativo; la función abs(b × $x-c$) es el valor absoluto de la expresión $b \times x-c$. Los motivos pueden variar ampliamente, según sean los valores que se asignen a las letras *a, b* y *c*, que son, en la fórmula, valores constantes.

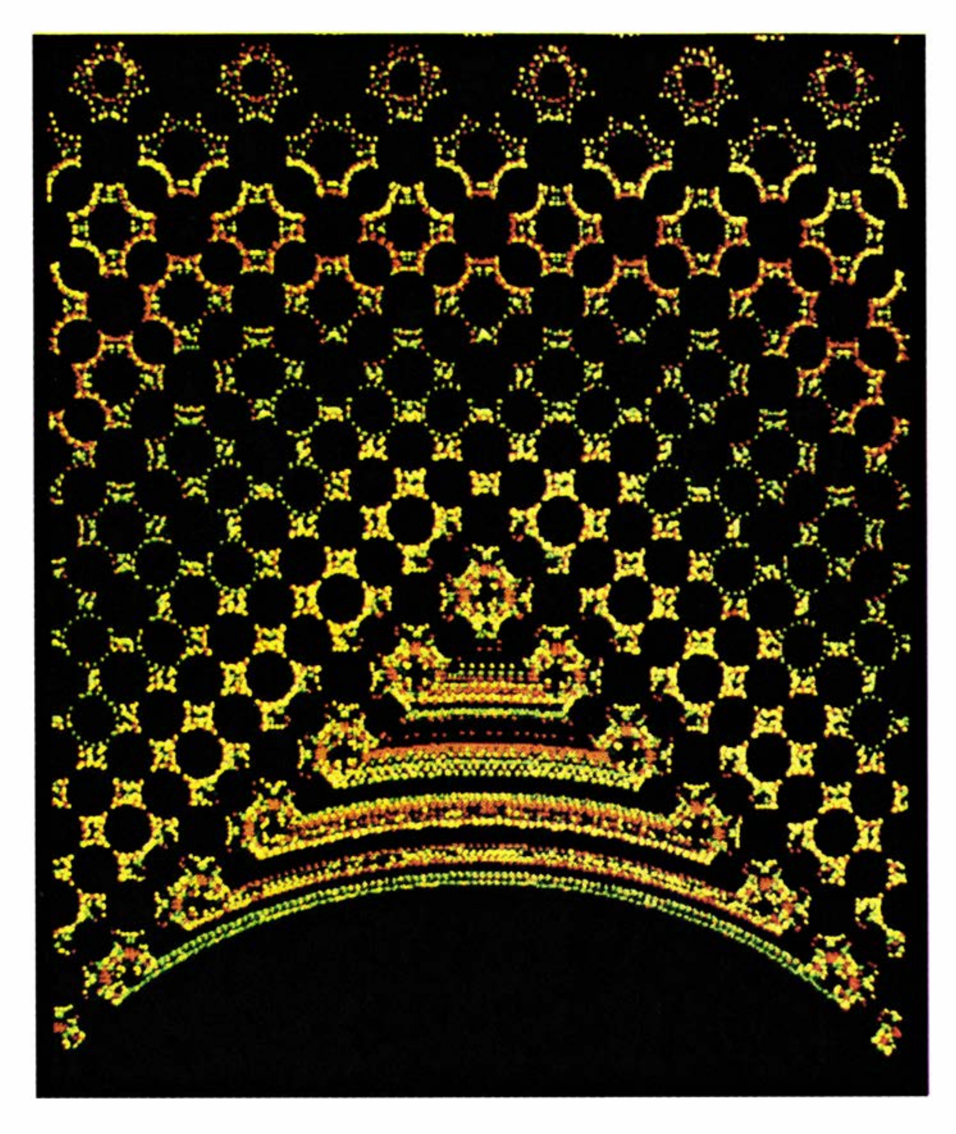
Las fórmulas están escritas en una especie de notación matemática abreviada. Se sobrentiende que en la fór-

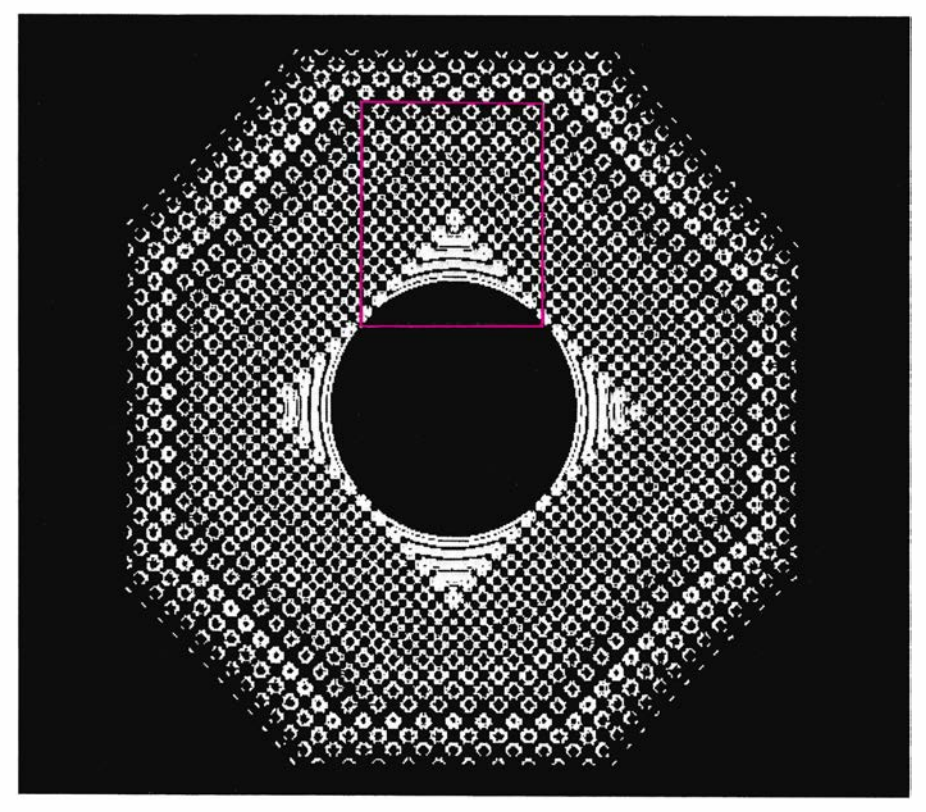






1. Círculos y cuadrados módulos 2, 3 y 4, correspondientes al programa CÍRCULO², *de John E. Connett*





2. *Decoración "fractal" generada por el pograma* SALTARÍN, *de Barry Martin*

mula se utiliza un conjunto de valores para las x e y situadas a la derecha de las flechas, y que a partir de ellos se calculan los nuevos valores de x e y, situadas a la izquierda. A continuación, los valores nuevos así calculados pasan a desempeñar el papel de los viejos, a la derecha de las flechas, y se repite el cálculo. De ese modo, el programa que yo llamo SALTARÍN va saltando de unos puntos a otros. Parte del punto en que x e y son ambos iguales a 0, es decir, el origen de coordenadas. El punto siguiente podría encontrarse en el ángulo superior derecho, y el siguiente, en el inferior izquierdo. Tan rápidamente calcula el ordenador los puntos, que se tiene la impresión de que sobre la pantalla cae una lluvia electrónica en miniatura. Cientos y, en seguida, millares de puntos brillan en el monitor. Pronto empezamos a detectar una regularidad, un motivo. Por ejemplo, tomando a igual a -200, b igual a 0,1 y c igual a -80 se forma un motivo sensiblemente octogonal [*véase la ilustración inferior de la figura 2*]. Ampliando el motivo y coloreando cada punto según el número de saltos necesarios para llegar hasta él, el motivo se convierte en una maravillosa cartela [*véase la ilustración superior de la figura 2*]. Al dar a a, b y c otros valores, surgen nuevos diseños. Pruébese, por ejemplo, con a=0,4, b=1, y c=0 [*véase la ilustración superior de la figura 3*] o bien, a=$-$3,14, b=0,3 y c=0,3 [*véase la ilustración inferior de la figura 3*].

El algoritmo de SALTARÍN es de comprensión casi tan fácil como el de CÍRCULO[2]:

entrada *num*
entrada *a, b, c*

$x \leftarrow 0$
$y \leftarrow 0$
para $i \leftarrow 1$ hasta *num*
  dibujar (x,y)
  $xx \leftarrow y - \text{signo}(x) \times [\text{abs}(b \times x - c)]^{1/2}$
  $yy \leftarrow a - x$
  $x \leftarrow xx$
  $y \leftarrow yy$

Nueva estampida de lectores que salen disparados a tipografiar el programa. Las recompensas por quedarse aquí, al pie del cañón, serán una explicación más completa del programa de Martin y una descripción del tercer programa para motivos decorativos.

Para ejecutar SALTARÍN se da a la máquina el número total de iteraciones, que se guarda en la variable *num*; se le proporcionan igualmente valores para a, b y c. Cuanto mayor sea el valor de *num*, tanto más fino el detalle del mo-

tivo. Por ejemplo, si *num* es 10.000, el programa dibujará en la pantalla 10.000 puntos pero, para ciertos valores de *a, b* y *c*, eso no es más que el principio. Si *a* es −1000, *b* es 0,1 y *c* es −10, el motivo, a baja ampliación, nos recuerda la corteza de un limón de cuatro lóbulos [*véase la figura 4, abajo*]. Cuando el programa se hace pasar de 10.000 puntos a 100.000, y después a 600.000, la filigrana se va haciendo cada vez más ornamentada [*véase la composición superior de la figura 4*].

El algoritmo puede funcionar tal cual está, pero también puede ampliarse; por ejemplo, se podrían añadir instrucciones que permitieran llevar a la pantalla los puntos situados fuera de ella, o para comprimir a la región visible regiones situadas fuera de la pantalla. Si se opta por incluir tales características, será preciso añadir, al principio del programa, otros tres parámetros más, para determinar la posición y la escala. Deberá entonces modificarse el cuerpo del programa principal: justamente después de calcular *x* e *y*, la versión ampliada de SALTARÍN suma a *x* e *y* los cambios de posición, y multiplica los resultados por el factor de escala.

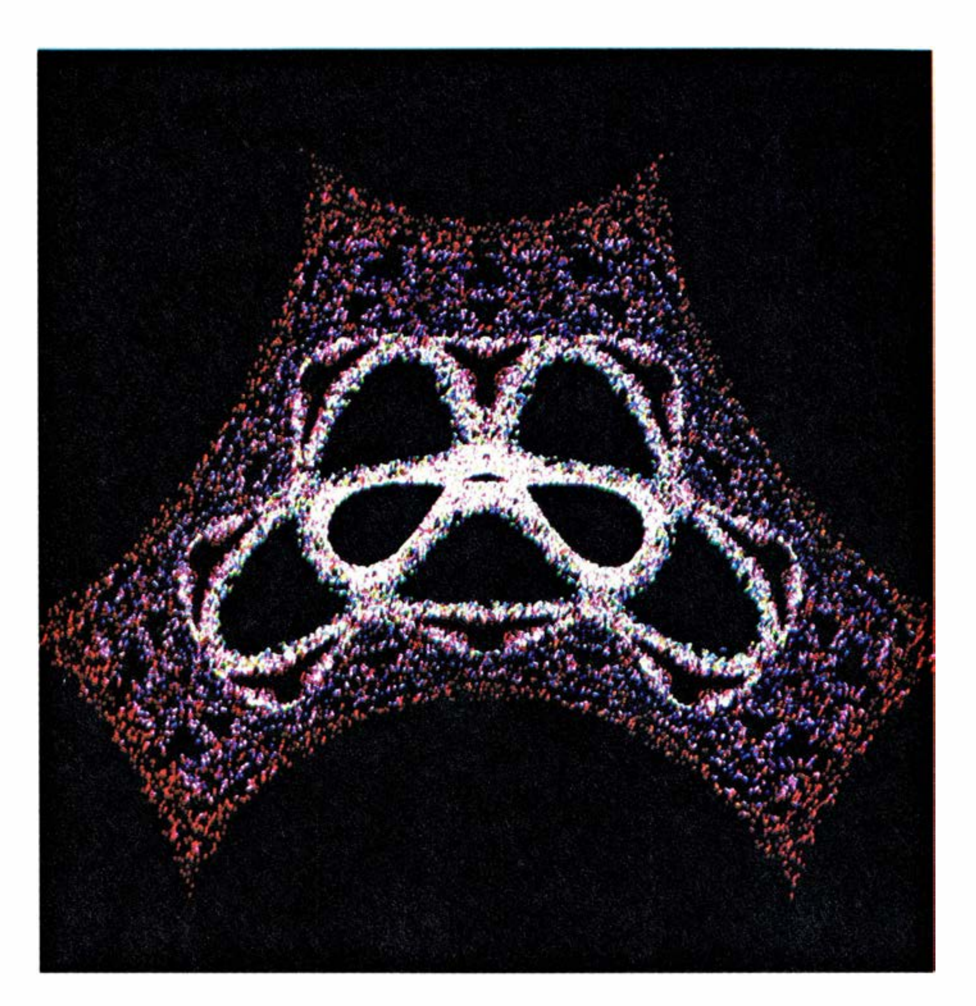
Tampoco Martin perdió de vista la analogía con los papeles pintados: "Me da la impresión de que estamos al borde de una explosión de generación de motivos, de grandes consecuencias comerciales; por ejemplo, dentro de pocos años quizá veamos tejidos y papeles pintados de 'firma'. Los motivos los producirá el cliente, sin más que seleccionar unos cuantos números." Martin muestra parejo entusiasmo acerca de las consecuencias que ello tendrá para la biología matemática. Volvamos a observar el limón de cuatro lóbulos. Las ampliaciones muestran detalles que recuerdan vivamente los haces vasculares: ¿podría tratarse de la sección transversal de la corteza externa de una monocotiledónea?

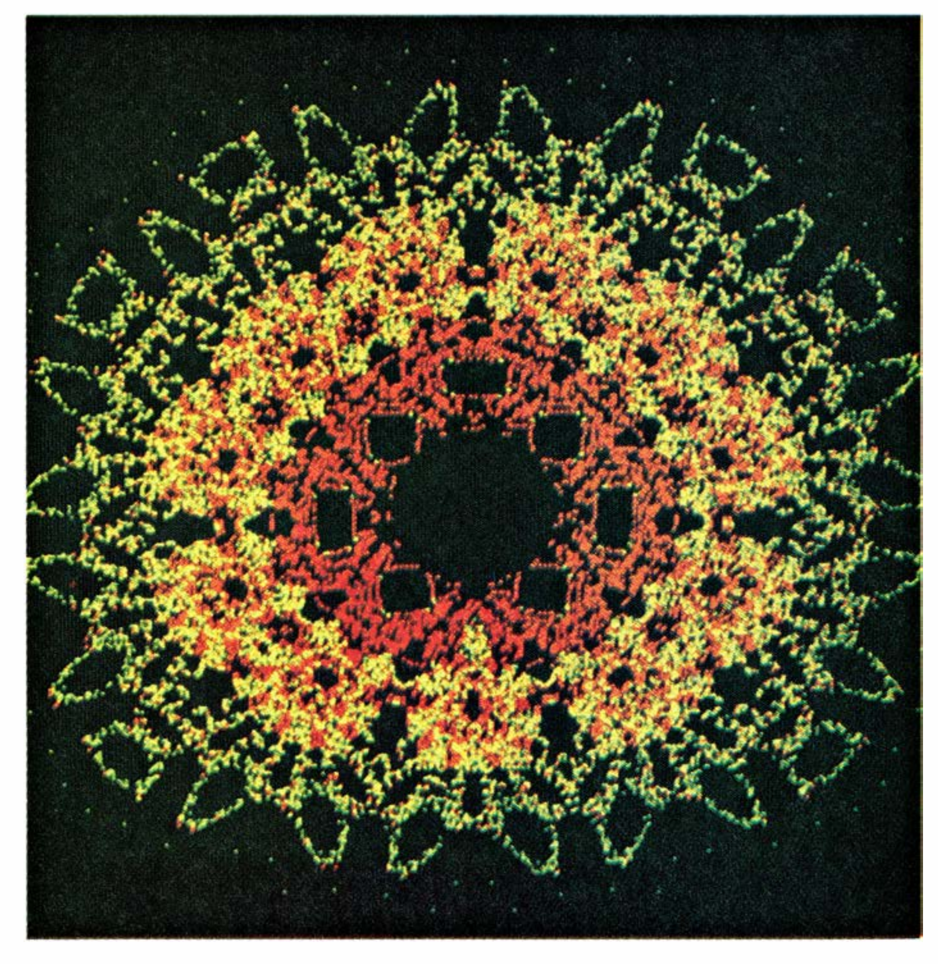
Al respecto de estos y otros motivos, Martin escribe: "Claramente, estas curiosas configuraciones nos muestran que las reglas responsables de la construcción de las complejas estructuras de los tejidos vivos pudieran ser de una simplicidad absurda."

A los lectores podría agradarles la exploración de las pautas generadas por un par de fórmulas de iteración distintas, también sugeridas por Martin:

$$x \leftarrow y - \text{sen}(x)$$
$$y \leftarrow a - x$$

En estas fórmulas basta con especificar la variable *a*. Martin ha descubierto una serie de motivos sumamente inte-



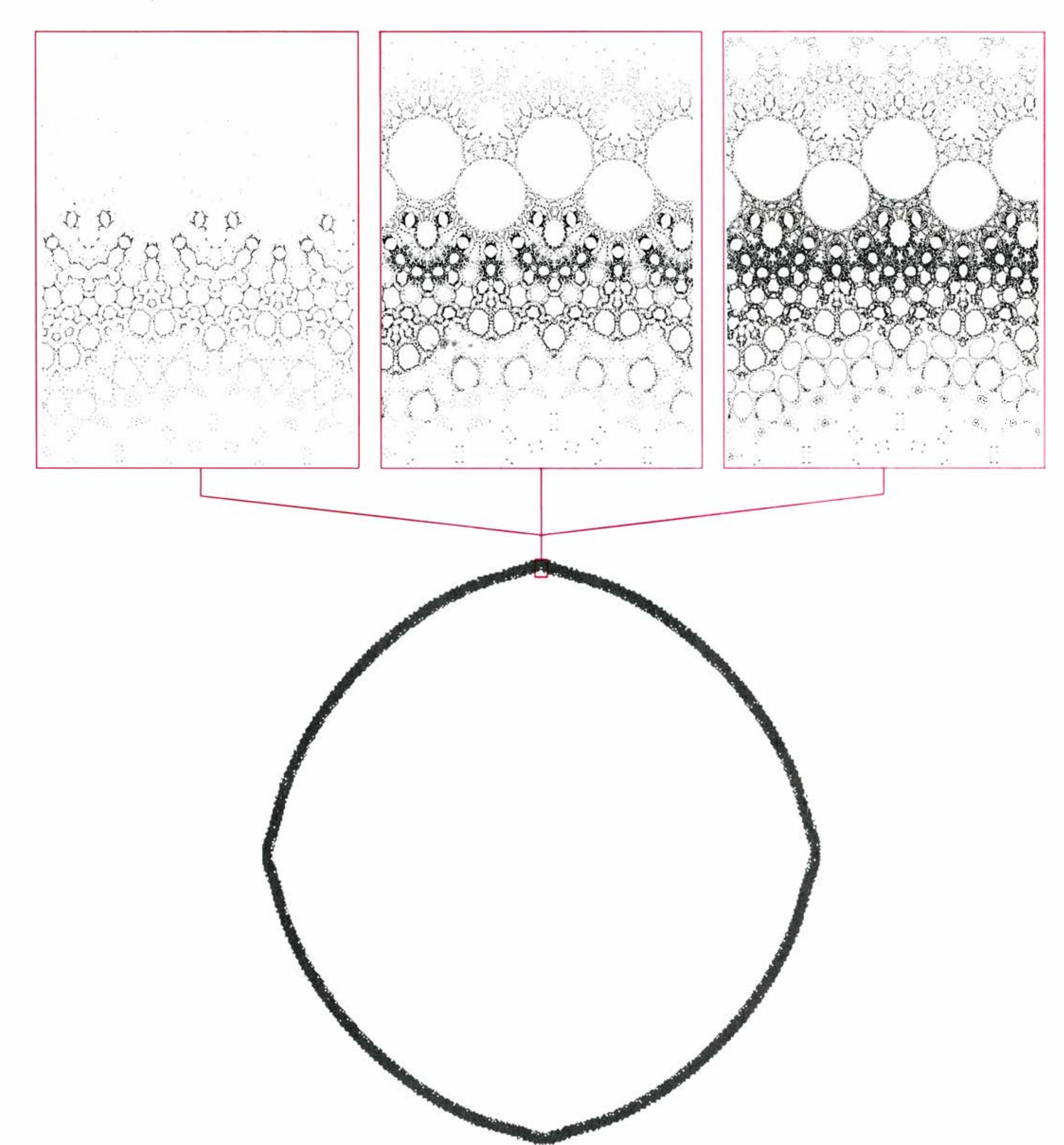


3. Mandalas sobre el número 7, generadas por la fórmula de iteración de Martin

resantes cuando *a* se encuentra a menos de 0,07 del número pi.

La tercera clase de motivos para decoración mental debe reservarse a habitaciones destinadas a pensar intensamente. Los motivos van desde las complejidades persas hasta los excesos incas [*véase las figuras 6 y 7*]. Difícilmente podrían los métodos conducentes a ellos ser más distintos de las técnicas recién descritas. Tony D. Smith, de PICA Pty. Ltd., Australia, ha ideado complicadas variaciones del autómata celular autorreplicante inventado en 1960 por Edward Fredkin, del Instituto de Tecnología de Massachusetts [véase "Juegos de ordenador", por Brian Hayes; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1983]. Aquella idea contiene una asombrosa potencialidad para la creación de motivos, y Smith ha empezado a explorar un ameno rincón de un inmenso espacio de posibilidades.

¿Qué es el autómata celular de Fredkin? Imaginemos un cuadriculado bidimensional infinito. En cada instante dado, cada casilla puede encontrarse en uno de dos estados: viva o muerta, por así decirlo. En algún lugar, un imaginario reloj va desgranando los instantes. La suerte que corra cada casilla está determinada por sus cuatro vecinos adyacentes: si el número de vecinos vivos en un determinado golpe de reloj es par, la casilla estará muerta al si-



4. Modelo del tallo de una planta y de sus haces vasculares, generados por SALTARÍN

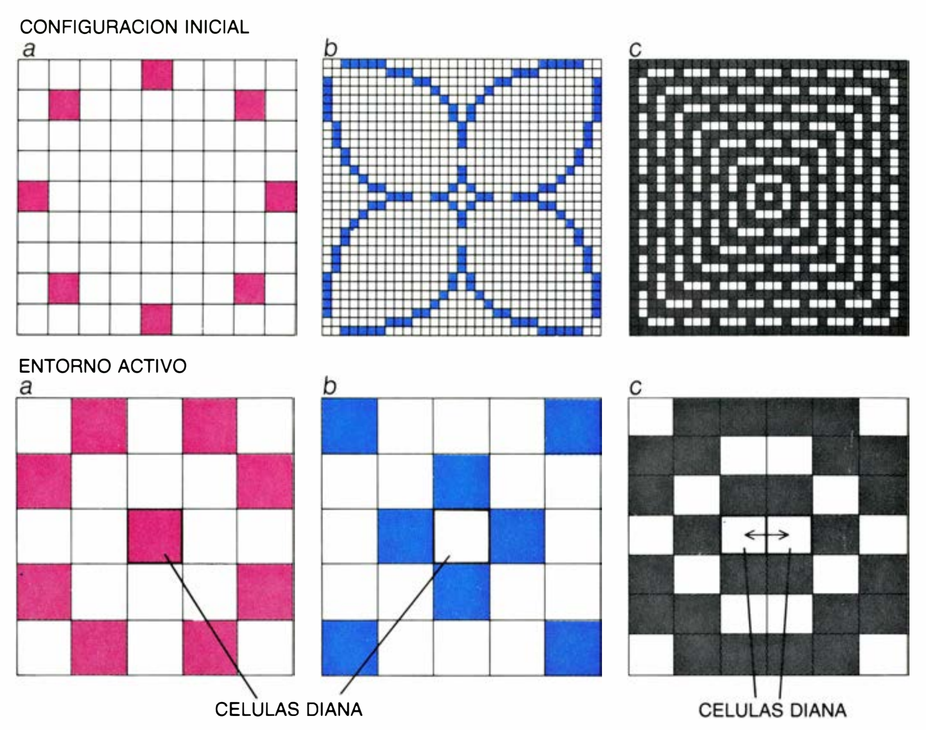
guiente golpe, sea cual fuere su estado precedente. Por otra parte, si el número de celdillas vivas adyacentes es impar, la casilla tendrá vida en el próximo golpe. La misma regla se aplica simultáneamente a todas y cada una de las casillas del cuadriculado plano.

El autómata de Fredkin está emparentado de cerca con el Juego de la Vida, de John Horton Conway, de la Universidad de Cambridge, que se ha presentado varias veces en esta sección. El autómata de Fredkin, sin embargo, fue descubierto antes que el de Conway, y es mucho más sencillo. Además, tiene una asombrosa propiedad, que no comparte Vida: cualquier configuración inicial de celdillas vivas va creciendo durante una serie de generaciones (golpes del reloj) y acaba produciendo cuatro copias de sí misma. Al cabo de algunas generaciones más hay 16 copias; después ya son 64, y así sucesivamente. Los motivos más exquisitos aparecen durante las generaciones intermedias, es decir, en las generaciones comprendidas entre aquellas en que la población original de celdillas vivas se reproduce.

El programa de Smith para imprimir motivos decorativos por generalización del autómata de Fredkin es sumamente versátil; Smith lo ha bautizado PATTERN BREEDER y, puesto que su función es, precisamente, CREAR UN MOTIVO, lo llamaremos CREATIVO. Las reglas que determinan en CREATIVO la suerte que correrá una casilla dada no tienen por qué ser función, exclusivamente, del estado de las cuatro casillas adyacentes. En efecto, antes de ejecutar el programa se puede especificar la configuración de células adyacentes que constituirán el entorno activo de cada célula.

El programa aplica la misma regla de paridad que la empleada por el autómata de Fredkin original. A cada golpe del reloj, si el número de células vivas del entorno activo es par, la célula diana estará muerta durante la generación siguiente. De lo contrario seguirá viva.

CREATIVO comienza a trabajar a partir de una configuración de células que le proporciona el usuario. Así, la configuración inicial designada *a* en la fila superior de la figura 5 origina la parte roja del motivo que vemos en la figura 6: cualesquiera que sean la célula diana y la fase en que se encuentre la evolución del motivo, el entorno activo es el mismo. El propio entorno es un motivo complejo, formado por todas las células coloreadas de una matriz de 5 por 5, que también está designada *a* en la fila inferior de la figura 5. Fijémonos en que el entorno activo incluye en este caso la propia célula diana. Para aplicar la regla, se cuenta el número de células vivas que coinciden con las células del entorno activo; si la célula diana se encuentra con vida en ese momento, se la incluye también en la cuenta. Se muestran también las configuraciones iniciales y entornos activos asociados con cada una de las otras dos imágenes. Los rotulados *b* corresponden a la parte azul del motivo de la figura 6, mientras que los rotulados *c* corresponden a la figura 7. En el caso del entorno *c* se suma otra complejidad: la célula diana va oscilando, en el centro del entorno, una y otra vez, de izquierda a derecha, en las sucesivas generaciones.



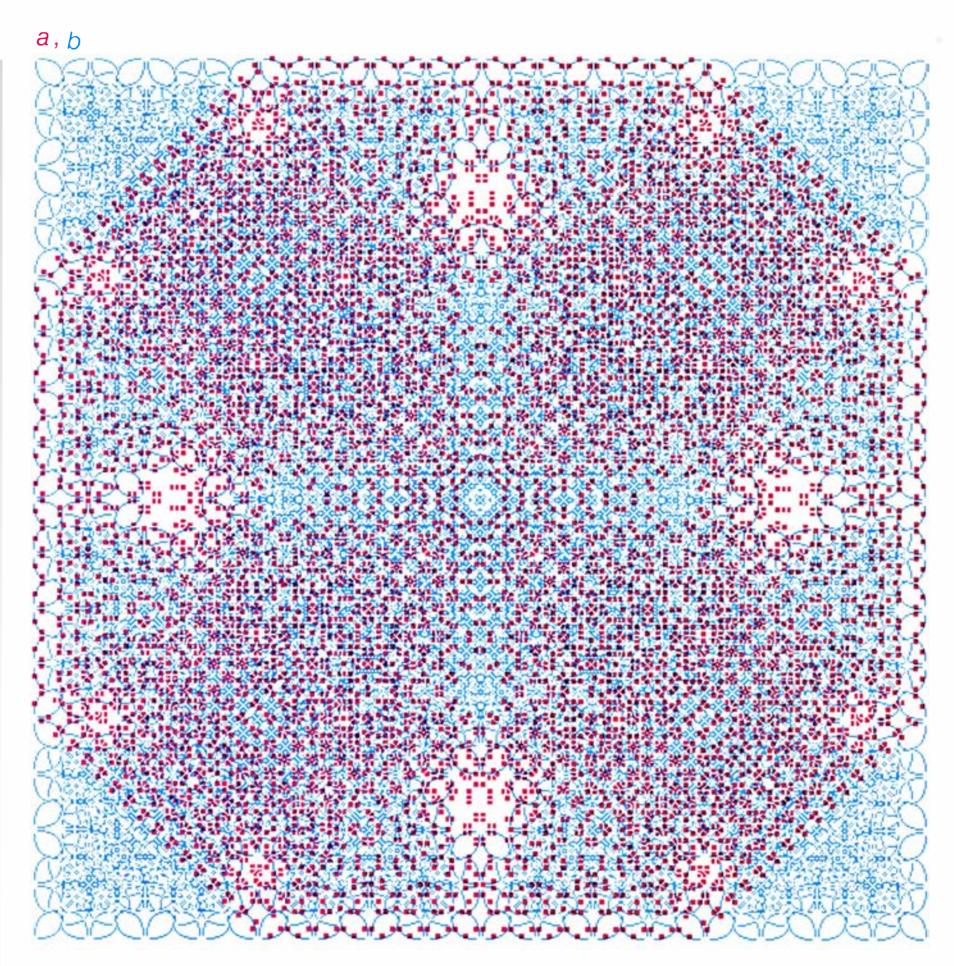
5. Reglas para generar autómatas celulares con el programa CREATIVO

No me propongo describir CREATIVO en todo su complicado refinamiento; describiré, en cambio, uno más sencillo, al que llamaré FREDKIN. Los lectores que tengan un poco de sagacidad y destreza en la programación podrán entonces convertir FREDKIN en un programa más general, provisto de algunas de las características de CREATIVO.

```
   entrada del motivo inicial
S  para cada una de las casillas de la for-
                     mación de la pantalla
      cuenta ← 0
      para cada entorno de esa casilla
         si la vecina está viva,
            entonces cuenta ← cuenta+1
      si cuenta es par
         entonces casilla ← 0
         si no, casilla ← 0
            dibujar casilla
   dar entrada a go
   ir a S
```

Uno de los grandes placeres de redactar algoritmos es el gran número de posibles niveles de descripción de que se dispone. La divisoria que separa la generalidad descriptiva de las vaguedades irresponsables es un trazo muy tenue. Los lectores habrán observado que, según se ha especificado, FREDKIN ocupa un estrato de abstracción un poco más enrarecido que los algoritmos esbozados antes. Por ejemplo, la instrucción "entrada del motivo inicial" exigirá, para ejecutarla en cualquier lenguaje de programación de uso práctico, varias instrucciones. Cualesquiera instrucciones de ese tipo entrañarían un bucle doble, con dos índices, *i* y *j*. Otro bucle se oculta en la instrucción "Para cada casilla de la matriz de la pantalla". En este caso, los dos índices proporcionan las coordenadas de los puntos de la pantalla de presentación, o de la impresora.

En el interior, el bucle principal del programa FREDKIN se limita a ejecutar la regla que determina la evolución de un motivo determinado. Cuenta el número de vecinas vivas que tiene cada casilla (*i,j*); seguidamente, si el número es impar, imprime, o dibuja en la pantalla, la casilla, considerándola un punto único. La última instrucción del bucle principal pide que se le asigne valor a la variable *go*. En esta fase, el usuario puede dar cualquier número, a fin de que FREDKIN genere el siguiente motivo. De este modo podremos detener la ejecución del programa si llega a aparecer algún motivo especialmente grato. A veces, una pequeña trampa y



6. *Superposición de dos imágenes generadas por* CREATIVO

un enunciado *go-to* resultan muy útiles. Tal estrategia no será precisamente programación estructurada, pero va muy bien.

Me encantaría publicar, dentro de tres meses, los más exquisitos motivos para decoración que los lectores me hayan podido enviar. Los demás se archivarán en mi nuevo muestrario, que presentaré cuando vuelva a tocar el tema, si la ocasión se presenta.

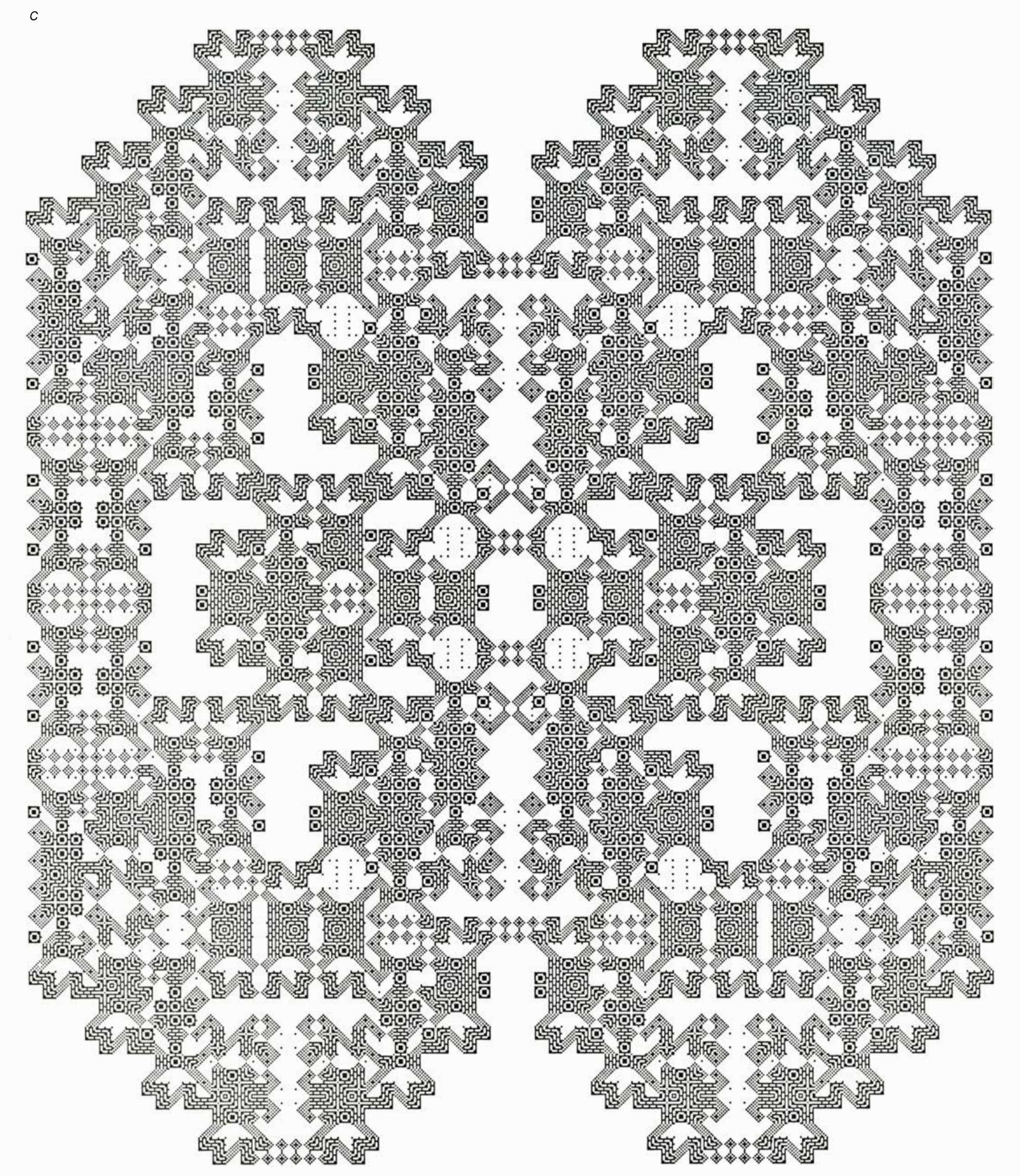
La sección del mes pasado sobre informagia dejó pendiente de explicación la lógica interna de dos de los trucos. El primero de ellos se basa en el conocido truco "Stop!", de Harry Lorayne, un ilusionista neoyorkino. Un voluntario extrae una carta del centro de un mazo bien barajado y seguidamente la devuelve a su lugar. El voluntario reparte los naipes en seis mazos más pequeños y busca el mazo que contiene la carta que ha elegido. El ordenador indica al voluntario que vaya dando los naipes; después de dar cada carta, el ordenador va diciéndole al voluntario si ha de seguir dando cartas, o si ha de detenerse, indicándole así la posición de la carta en el mazo.

¿Cómo puede el ordenador detenerse en el naipe elegido? La respuesta es que, cuando el voluntario va dando los seis mazos, en cada una de esas seis pilas entrará una de las seis cartas centrales del mazo. Todas esas seis cartas ocuparán la misma posición relativa dentro de su pila, a saber, la cuarta. Dado que el voluntario solamente va dando los naipes de una de las pilas, a saber, la que contiene la carta elegida, el ordenador puede siempre elegir la carta deteniendo el reparto después de la cuarta.

El segundo de los trucos pendientes de explicación se basaba en el teclado de una calculadora ordinaria. Un voluntario anota en la calculadora dos números de tres cifras, los multiplica y dice en voz alta todas las cifras del producto, menos una. ¿Cómo puede el mago adivinar el dígito que falta?

De acuerdo con las instrucciones del mago, cada uno de los números de tres cifras elegidos por el voluntario ha de estar formado por los números de una fila, columna o diagonal. Tal número tiene la propiedad "mágica" de que su raíz digital es múltiplo de 3. Concretamente, la suma de sus cifras será un número de una o dos cifras. Si tal suma tuviera dos cifras, la suma de éstas ya tendrá una sola cifra. En cualquiera de ambos casos, el número de una cifra re-

sultante es la raíz digital del número de partida (se llega al mismo resultado "sacando los nueves", como se hace en la conocida prueba de los nueves para las multiplicaciones y divisiones). Pues bien, en nuestro caso, la raíz digital de los factores siempre es múltiplo de 3. Por ejemplo, tomemos en la primera columna las cifras 471. La primera suma da 12, y enseguida, 3, que es múltiplo de 3. Por otra parte, al multiplicar los dos números de tres dígitos seleccionados por el voluntario, y someter al producto a este mismo y peculiar tratamiento, el resultado es 9. El procedimiento es equivalente a la multiplicación módulo 9 (de ahí la expresión "ir sacando nueves"). Si faltase una de las cifras del producto, la x, pongamos por caso, el resultado de echar fuera los nueves al manipular los restantes sería $9-x$. Ese número es el que el mago calcula cuando el voluntario lee en voz alta todas las cifras menos una. La mayoría de las veces, el conocimiento de $9-x$ permite calcular x instantáneamente.



7. Abstracción maya, fruto de un programa para motivos decorativos, de Smith

Taller y laboratorio

Los hologramas de arco iris, a diferencia de los convencionales, se observan con luz ordinaria

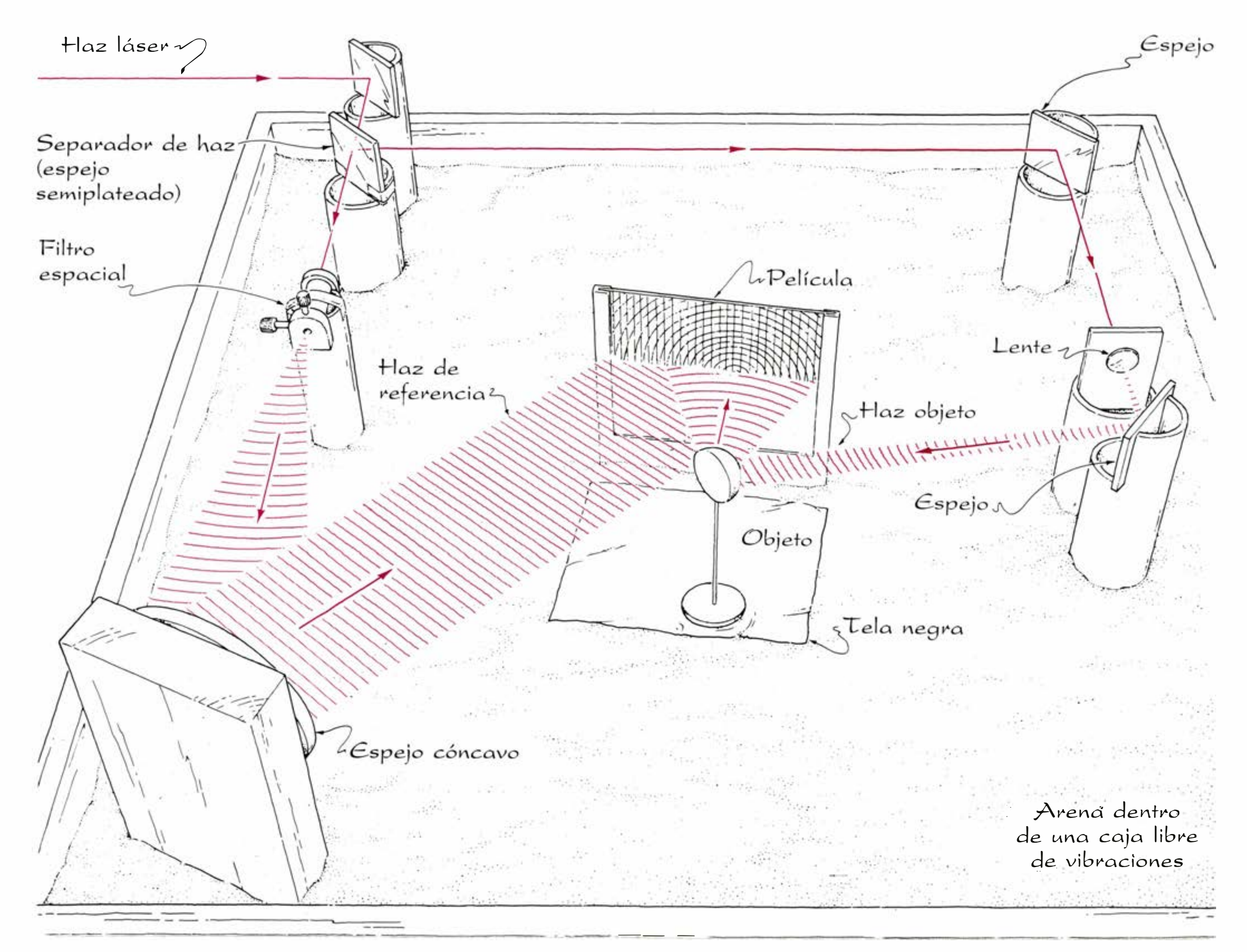
Jearl Walker

Los primeros hologramas que salieron al mercado planteaban al usuario una dificultad: para contemplarlos había que iluminarlos con luz monocromática; la de un láser, por ejemplo. Con luz blanca las imágenes aparecían borrosas, ya que cada longitud de onda del espectro visible formaba su propia imagen, levemente desplazada de las otras. Los hologramas de arco iris, desarrollados en 1969 por Stephen A. Benton, de Polaroid Corporation, se crearon con el fin de disipar la borrosidad sin dejar de producir imágenes coloreadas con luz blanca. Se emplean mucho en creaciones artísticas y artículos de fantasía y constituyen una medida cautelar en algunas tarjetas de crédito.

Con ayuda de Douglas S. Hobbs, que estudió holografía de arco iris bajo la dirección de Richard W. Henry, de la Universidad de Bucknell, he venido examinando este fenómeno. Me he apoyado asimismo en dos obras excelentes. En una de ellas, *Seeing the Light: Optics in Nature, Photography, Color, Vision, and Holography,* de David Falk, Dieter Brill y David Stork, se aborda la óptica de los hologramas y los equipos necesarios para producirlos. En la otra, *Holography Handbook: Making Holograms the Easy Way,* de Fred Unterseher, Jeannene Hansen y Bob Schlesinger, se da toda clase de detalles acerca de cómo obtener cualquier tipo de holograma gastando poco dinero.

Los hologramas de arco iris suelen producirse a partir de hologramas normales; es necesario, pues, conocer las características esenciales de tan notorio fenómeno. No se trata de una fotografía clásica, obtenida tras enfocar, mediante una lente, la imagen de un objeto sobre una película fotográfica, sino que es un registro fotográfico de la figura de interferencia que forman dos haces luminosos, uno de los cuales se ha reflejado en el objeto.

En uno de los posibles montajes, el haz procedente de un láser se divide en dos con un espejo semiplateado. La parte del haz que lo atraviesa pasa seguidamente por un filtro espacial: una lente enfocada en un estenope. Este se halla, a su vez, en el foco de un espejo cóncavo. Cuando la luz se refleja en el



1. *Montaje para construir hologramas*

espejo, el haz resultante (haz de referencia) sólo consta de ondas planas: los frentes de onda son planos y los rayos son perpendiculares a éstos y paralelos entre sí.

La parte de la luz que se refleja en el espejo semiplateado es conducida por otros espejos y una lente la esparce para que se refleje en el objeto. Este haz (haz objeto) está compuesto por frentes de onda curvos y rayos divergentes. Para simplificar, supondremos que el objeto es puntual, lo que implica que los frentes de onda serán circunferencias centradas en él y los rayos de luz seguirán trayectorias radiales.

Ambos haces, el de referencia y el objeto, atraviesan una película fotográfica, donde se interfieren mutuamente. Como resultado, la película registra líneas finas en aquellos puntos donde los haces se interfieren constructivamente (las crestas de uno coinciden con crestas de otro y lo mismo ocurre con los valles) dando lugar a una luz intensa que impresiona los granos de plata. Entre estas líneas aparecen otras que se producen donde los haces se interfieren destructivamente (las crestas de uno coinciden con los valles de otro), dando lugar ahora a una zona oscura en la que los granos quedan sin impresionar. Cuando esa película se revela, las zonas no impresionadas aparecen transparentes y, opacas, las impresionadas. Tal película es ya un holograma: un registro permanente de la figura de interferencia de los dos haces.

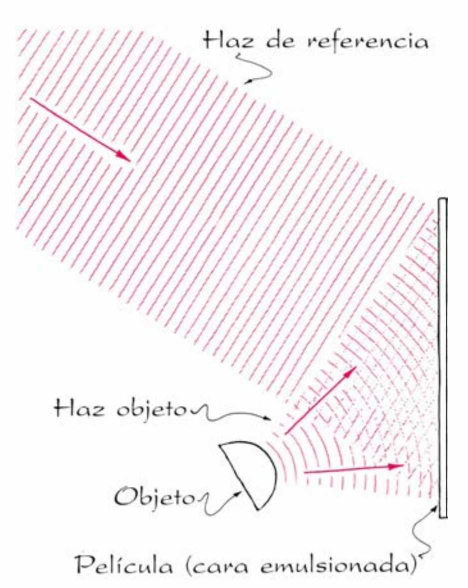
Podremos registrar una figura de interferencia si, en cada punto de la película, las ondas del haz objeto mantienen una relación de fase fija con las ondas del haz de referencia. Si no fuera así, cada punto de la película recibiría en un instante una interferencia destructiva y en otro instante una interferencia constructiva. Con ello, se impresionaría toda la película y no quedaría registrada figura alguna.

Para crear una relación de fase constante entre los dos haces se necesita una luz coherente: la de un láser lo es. La luz que sale de un láser podemos imaginarla como una sucesión de largos trenes de onda. Cada tren está constituido por una onda continua cuya longitud (la longitud de coherencia) es aproximadamente la misma que la del tubo del láser. Cuando los haces de referencia y objeto lleguen a la película mantendrán, si forman parte del mismo tren, una relación de fase constante. Esta situación se consigue haciendo que las distancias que recorren ambos haces antes de alcanzar la película sean aproximadamente iguales. Cada punto de la película recibirá así un único tipo de interferencia y se registrará una sola figura de interferencia.

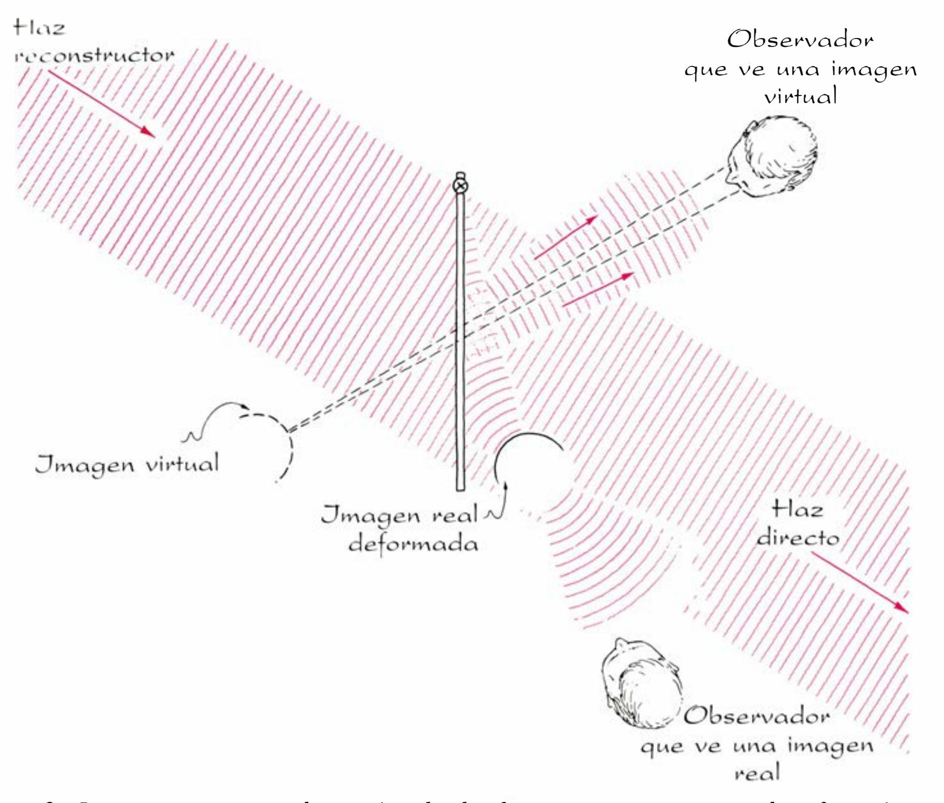
Esa figura resulta demasiado fina para distinguirla a simple vista. Examinando el holograma con luz ambiental no se ve imagen alguna del objeto. Pese a ello, en el holograma están registrados todos los detalles del mismo. Para visualizar el objeto, el holograma se ilumina con un haz de láser (llamado haz reconstructor) igual al haz de referencia original. Ese haz se difractará al atravesar la figura de líneas contenida en el holograma. En su mayoría, la luz lo atravesará directamente sin cambiar de dirección, pero parte de ella se difractará formando dos haces nuevos, uno a cada lado.

Si se mira el holograma con la visual dirigida según uno de esos haces laterales, se contemplará una imagen del objeto. En uno de los haces las ondas salen del holograma viajando en las mismas direcciones en que lo hacían las ondas del haz objeto original. Esas ondas interceptadas se enfocan en la retina de cada ojo. Pero como los ojos están separados e interceptan diferentes porciones de las ondas divergentes, las ubicaciones de las imágenes en la retina difieren, efecto éste llamado de paralaje. El sistema visual humano interpreta esa diferencia de ubicación como una señal de que la fuente luminosa se halla al otro lado del holograma, en el lugar que ocupaba antes el objeto. Todo ocurre como si el sistema visual extrapolara hacia atrás los rayos luminosos hasta que se crucen en la posición de la imagen percibida. Tal es la razón por la cual se percibe la escena con profundidad. De la imagen se dice que es virtual, ya que si se pone una tarjeta en blanco en su posición aparente no se forma en ella imagen alguna. Es decir, la imagen es un producto del sistema visual humano.

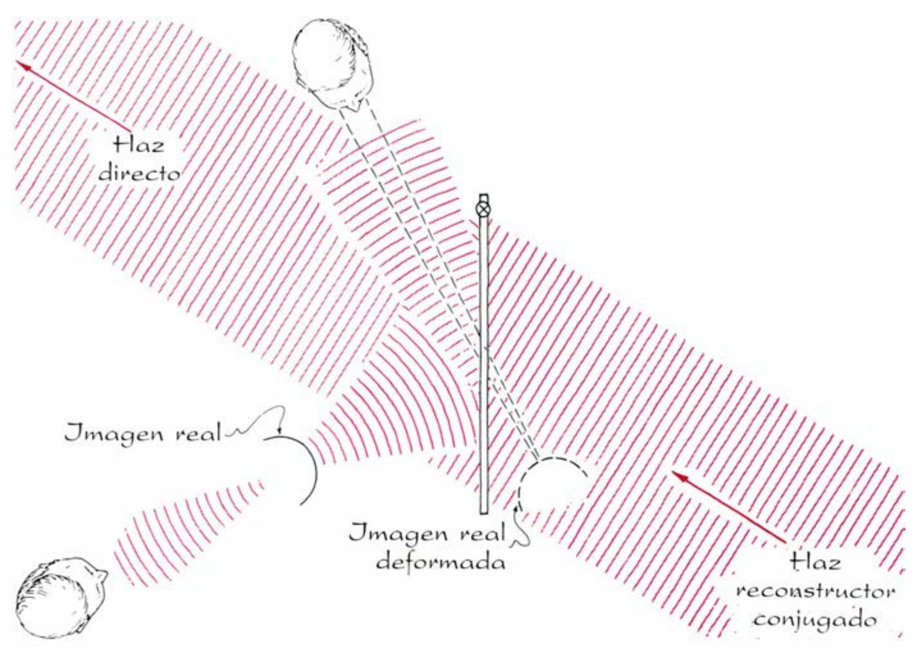
El otro haz de luz difractada se compone de ondas que primero convergen y luego divergen. Colocando una tarjeta en blanco en el punto de convergencia, aparecerá en ella una imagen real del objeto. Esa imagen puede verse también interceptando con la



2. Interferencia de ondas luminosas



3. Lo que ocurre cuando son iguales los haces reconstructores y de referencia



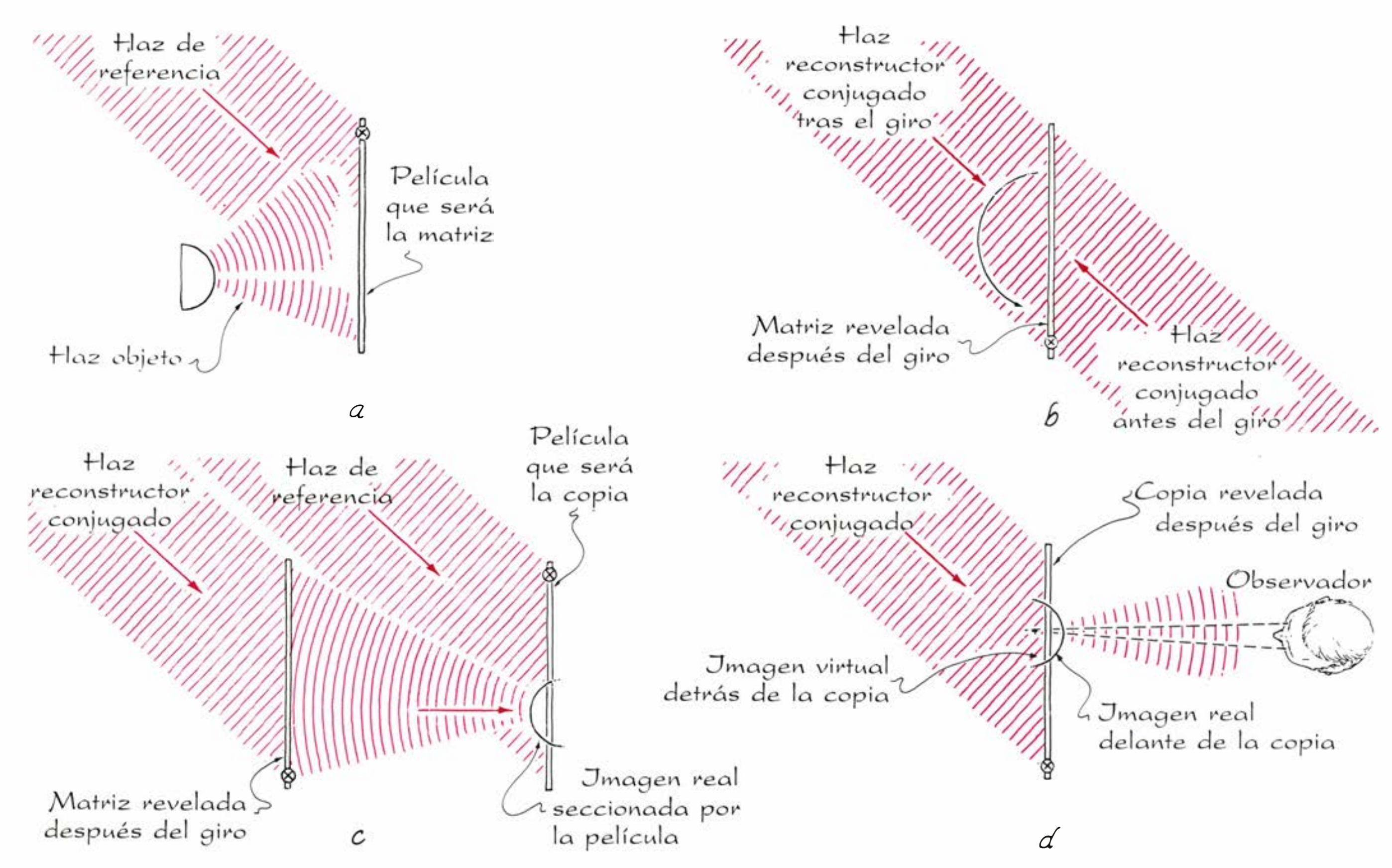
4. Imágenes creadas con un haz conjugado

vista la luz divergente procedente de la misma. Y de nuevo, a causa del paralaje, se percibe la imagen en una cierta posición, en este caso delante del plano del holograma. Sin embargo, suele estar tan distorsionada que resulta irreconocible; cabe incluso que con algunas disposiciones de los aparatos no aparezca en absoluto.

Una imagen real no deformada puede producirse enviando, a través del holograma, un haz luminoso en sentido contrario al del haz de referencia original. Este haz reconstructor se llama conjugado del haz de referencia. Igual que antes, parte de la luz se difracta en dos haces laterales: uno produce una imagen real y otro da lugar a una virtual. Esta vez, la imagen deformada, o ausente, es la virtual.

El holograma constituye una red de difracción. La red de difracción normal consta de líneas finas, paralelas y regularmente espaciadas. En un holograma las líneas no están regularmente espaciadas porque el haz objeto diverge. En cada punto de la película, el espaciado de las líneas depende del ángulo que forman entre sí los rayos de los haces de referencia y objeto que llegan a ese punto. Si el ángulo es pequeño, las líneas están muy separadas; si grande, el espaciado es estrecho. La variación en el espaciado de las líneas es el factor que origina la convergencia o divergencia de los haces difractados lateralmente cuando se ilumina el holograma con el haz reconstructor.

Supongamos que el objeto, en vez de puntual, sea extenso. Cada punto de su superficie reflejará luz divergente hacia la película, donde interferirá con el haz de referencia. La figura de interferencia registrada en la película es muy complicada. Aún así, cuando se envíe el haz reconstructor a través de la película revelada siguiendo el trayecto del haz de referencia o de su conjugado, se formarán haces laterales. De éstos, dos darán imágenes no deformadas. Si nuestra vista intercepta entonces cualquiera de ellos, la imagen será tridimensional a causa del paralaje. Si cambiamos el punto de vista dentro de un mismo haz, interceptando distintas



5. Cómo obtener una copia de una matriz

porciones de las ondas, veremos la imagen con una perspectiva diferente. Esto permite observar la parte delantera del objeto, o bien, cambiando de punto de vista, los costados del mismo, exactamente como si se estuviera contemplando el original. (Con este montaje es imposible ver el reverso del objeto porque los rayos procedentes del mismo no llegan nunca a la película.)

La imagen real no deformada producida por un haz reconstructor conjugado puede recogerse sobre una cartulina. Será borrosa, no obstante, ya que sólo algunas partes del objeto estarán enfocadas para cada posición de la cartulina. Cuando se mira la imagen interceptando los rayos, su profundidad aparece invertida: o sea, el frente del objeto parece más lejano que los costados, dando la impresión de que la imagen estuviese vuelta del revés. A esta imagen se le llama pseudoscópica.

Tal imagen producida por un holograma puede ser muy valiosa para una técnica en la que se obtiene un segundo holograma a partir del primero. Esta recibe el nombre de holografía de imagen enfocada o de imagen-plano, pues la copia se sitúa dentro de la imagen real a que da lugar la matriz. Dicha imagen real se consigue enviando a través del holograma matriz un haz reconstructor conjugado del haz de referencia matriz.

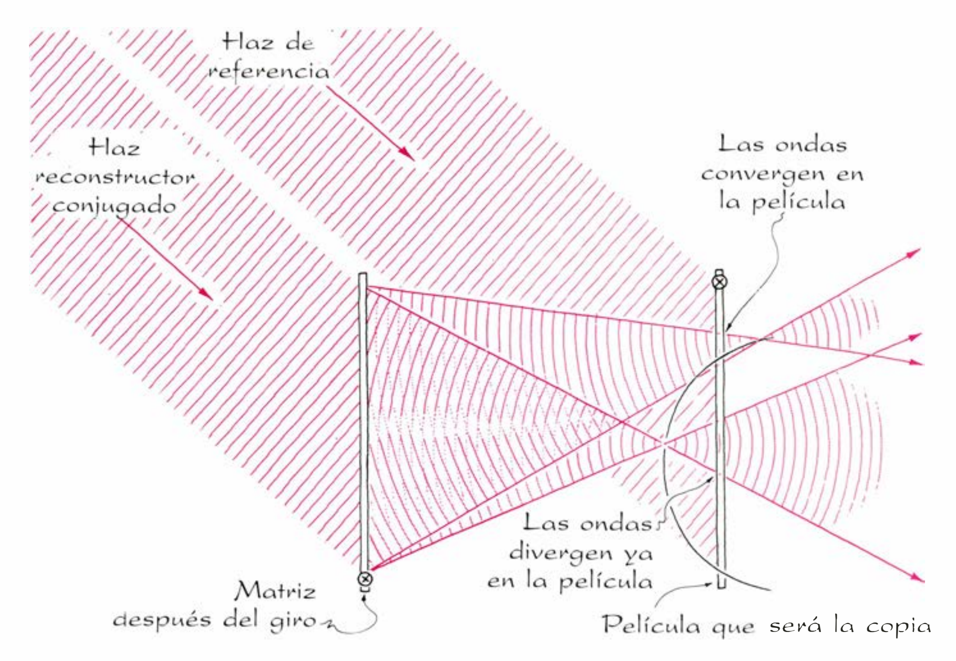
Para no tener que reorganizar las posiciones del láser y de los distintos dispositivos ópticos, sería deseable emplear el mismo haz que antes sirvió de referencia. Esto puede lograrse girando la matriz 180 grados en torno a un eje vertical, de modo tal que lo que antes fuera el haz de referencia sea ahora el haz reconstructor conjugado. En virtud de esta rotación, la luz atraviesa la matriz en sentido contrario al del haz de referencia original.

El haz que forma la imagen real hace entonces las veces de haz objeto en lo que respecta a la copia, a la que ilumina asimismo un haz de referencia. En la película se registra la figura de interferencia resultante de los dos haces. La copia, una vez revelada, se gira en torno a un eje vertical, de suerte que lo que antes fuera un haz de referencia sea ahora el haz reconstructor conjugado. Cuando nuestra vista intercepte la luz del haz difractada por la copia, percibiremos una imagen tridimensional que parece montada a horcajadas sobre el plano del holograma. La parte situada por delante del plano es una imagen real; la parte situada por detrás es una imagen virtual.

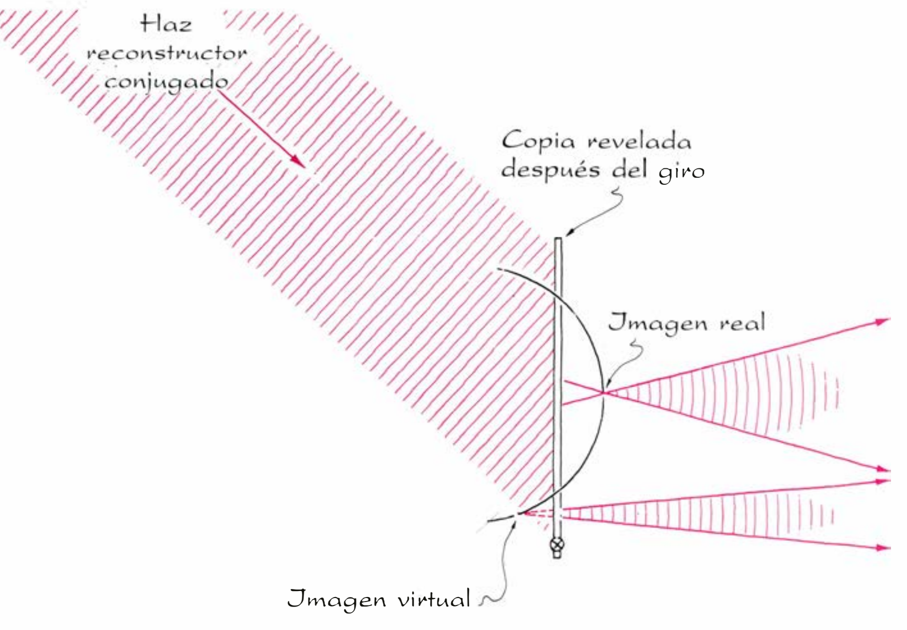
Esa imagen se forma como sigue. La luz que viaja desde la matriz hasta la copia converge formando una imagen tridimensional real, de la cual la película de copia saca una sección bidimensional. Los rayos que forman una imagen del frente del objeto convergen delante de la película y al atravesarla son ya divergentes. Los rayos que crean una imagen de las otras caras del objeto convergen detrás de la película, y cuando la atraviesan aún siguen convergiendo. La interferencia entre esos dos conjuntos de rayos y el haz de referencia registra la convergencia y divergencia de los rayos.

Cuando se revela la copia y se manda a través de la misma un haz conjugado, la difracción de la luz invierte lo que hicieron los rayos durante la impresión fotográfica de la copia. O sea, donde los rayos convergían, ahora divergen; donde divergían, ahora convergen. Cuando nuestra vista intercepta los rayos, vemos una imagen real de la parte delantera del objeto situada ante la copia y una imagen virtual de los otros lados del objeto situada detrás de la copia. Aunque la imagen real de la matriz sea pseudoscópica, la imagen final exhibe una profundidad normal.

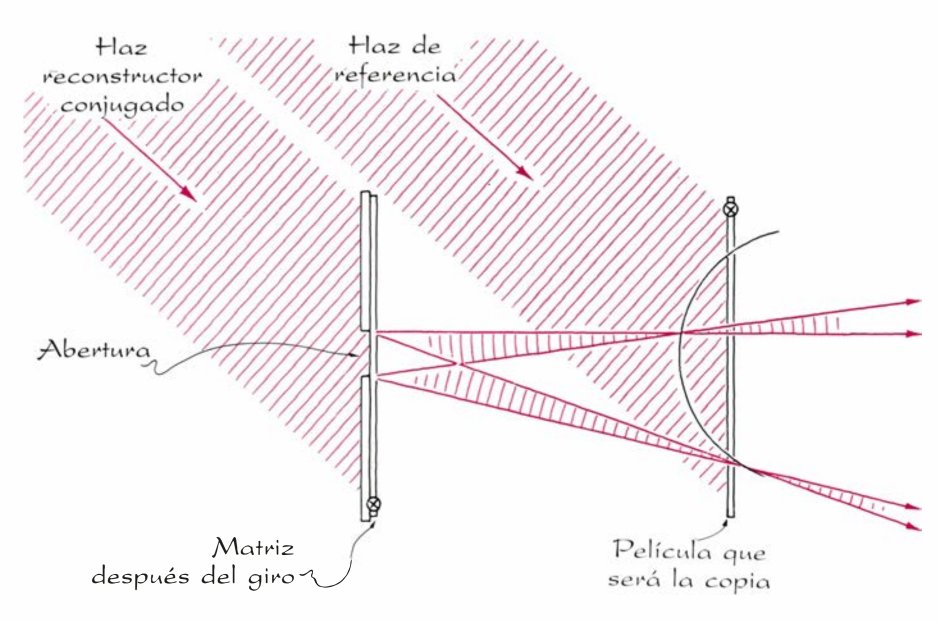
Si se envía luz blanca a través de la copia, en vez de la monocromática de un láser, cada longitud de onda del espectro visible se difractará bajo un ángulo levemente distinto y creará su pro-



6. Comportamiento de las ondas cuando se proyecta una imagen real sobre una película



7. Imagen vista en un holograma copia



8. Empleo de una abertura en un holograma matriz

pia imagen. El solapamiento resultante de un gran número de imágenes de color producirá una imagen compuesta borrosa. Benton descubrió un procedimiento que posibilita observar imágenes nítidas cuando la copia se ilumina con luz blanca.

En un holograma de arco iris, el haz reconstructor ilumina únicamente una estrecha banda de la matriz. De esta manera, aunque se pierda la información relativa a la profundidad en la dirección perpendicular a la banda, se conserva la relativa a la profundidad paralela a la banda. Por tanto, el holograma de arco iris parte de un compromiso: se elimina la posibilidad de paralaje en una dirección con tal de observar una imagen nítida con luz blanca.

Un método para conseguir un holograma de arco iris consiste en cubrir la matriz a excepción de una abertura que la atraviesa a lo ancho. En la figura 8, donde se presenta una vista desde arriba del montaje, la abertura es vertical. La información de paralaje acerca del objeto se conserva en la dirección vertical, pero se pierde en sentido horizontal. La anchura de la abertura aparece también registrada en la copia.

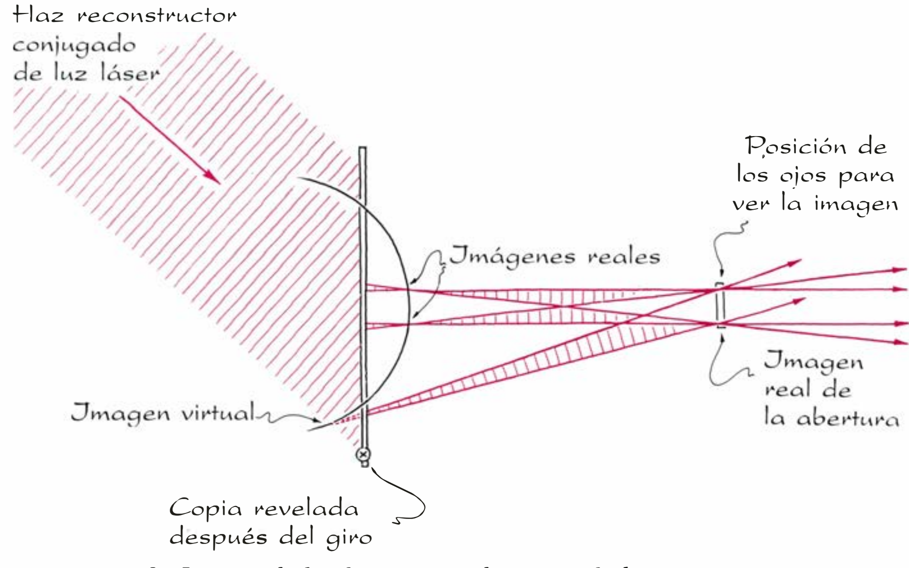
La copia revelada se observa en un haz de láser conjugado. (De nuevo, para que el haz de láser que sirvió de haz de referencia en la copia sirva ahora de haz reconstructor conjugado, la copia se gira en torno al eje vertical.) Los rayos luminosos que salen de la copia atraviesan una imagen real de la abertura que se encuentra delante de dicha copia. En la figura 9 la imagen de la abertura se extiende más a la derecha de la imagen real del objeto, que podremos ver si colocamos los ojos en cualquier lugar de la imagen de la abertura. Desplazándolos a otra posición dentro de la imagen de la abertura, veremos otra perspectiva del objeto. A lo largo de la dirección de la imagen de la abertura (verticalmente, en este caso) se retiene la información concerniente a la profundidad. Pero si retiramos los ojos de esa imagen, desaparecerá la imagen del objeto. En las direcciones que forman ángulo recto con la imagen de la abertura se pierde la información acerca de la profundidad.

Cuando se envía luz blanca a través de la copia, cada longitud de onda se difracta en cuantía distinta y crea una imagen de la abertura en posiciones diferentes delante del holograma. Si fijamos la mirada en la imagen de la abertura a que da lugar la luz roja, veremos una imagen roja del objeto. Conforme trasladamos la mirada por las demás imágenes de la abertura, veremos que la imagen va cambiando suavemente de color. Si tenemos puestos los ojos en una imagen de la abertura, no habrá distorsión. Pero si nos acercamos o alejamos demasiado del holograma, los rayos que atraviesan las distintas imágenes de la abertura se solaparán y veremos el objeto borroso.

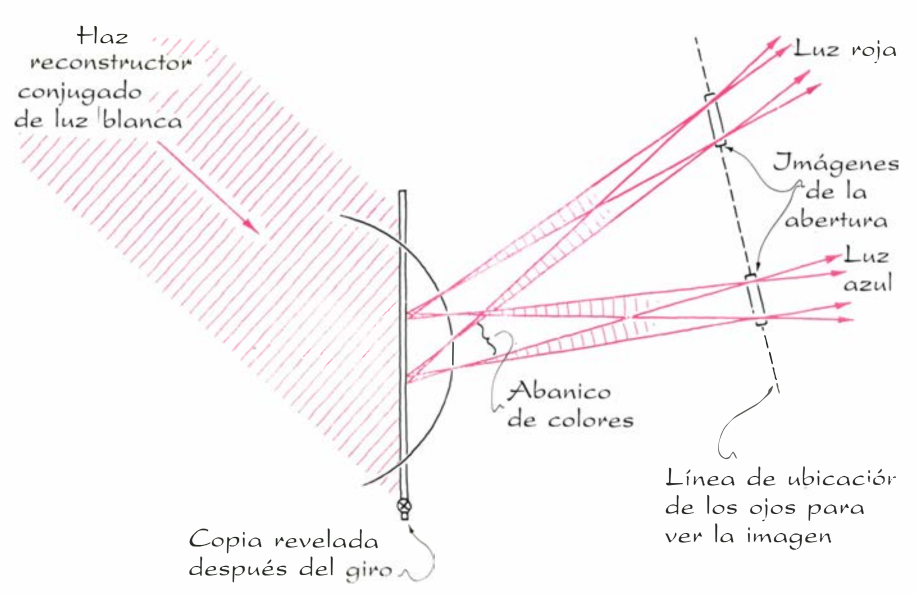
Hobbs ha ensayado varios procedimientos para hacer y observar cómodamente hologramas de arco iris. Suponiendo que se mantuviera vertical bajo luz descendente que incidiera sobre el costado más alejado, decidió poner el objeto tocando con la película al obtener la matriz. Una vez revelada la copia, la giró de modo que la luz descendente fuera conjugada del haz de referencia que tenía la copia cuando ésta se impresionó. Así consiguió que la parte superior del objeto apareciese en la parte superior del holograma.

Asimismo, se las arregló para observar a lo largo de una línea aproximadamente perpendicular al plano de la copia. Como el verde se encuentra en el centro del espectro visible, los rayos que formen la imagen verde de la abertura deben representar esa línea perpendicular. Desplazando los ojos hacia el holograma y hacia arriba, acertaremos con la imagen roja; si los alejamos y desplazamos hacia abajo, haremos que la imagen sea azul.

Calculó Hobbs que si los rayos de luz verde han de abandonar la copia aproximadamente perpendiculares al plano de la misma, tras llegar a ella bajo un ángulo de unos 45 grados, el espaciado entre las líneas de difracción del holograma debe ser del orden de 0,78 micrometros. (Esta cifra y las que siguen son meramente orientativas. Una dis-



9. Imagen de la abertura creada por un holograma copia



10. Imágenes coloreadas producidas por un holograma de arco iris

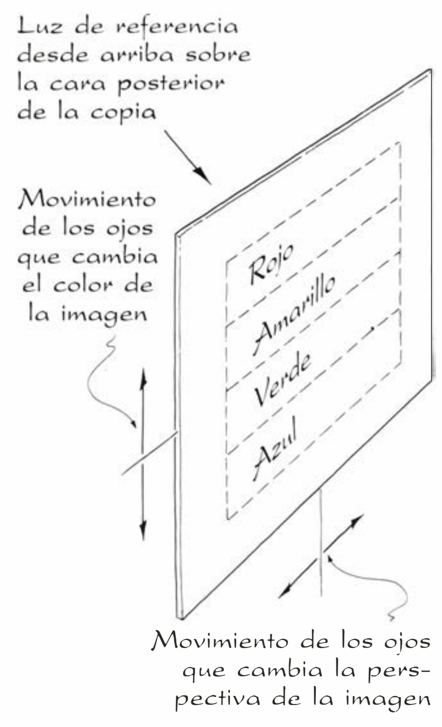
tribución tan compleja de líneas admite márgenes de variación.) Para ese espaciado, la luz del extremo rojo del espectro (0,7 micrometros de longitud de onda) se difracta unos 11 grados hacia un lado de los rayos verdes y la luz del extremo azul (0,4 micrometros de longitud de onda) se difracta unos 11 grados hacia el otro lado. Los colores intermedios se difractan bajo ángulos intermedios. El espectro completo de las imágenes de la abertura cubre un abanico de unos 22 grados.

También prestó atención a la distancia que debía haber entre la copia y los ojos del observador. Si la imagen verde de la abertura está a 35 centímetros de la copia, la del extremo rojo se hallará a unos 28 centímetros y la azul del otro extremo, a unos 48 centímetros. Estas distancias hacen muy cómoda la observación.

La separación de las líneas en la copia depende de la longitud de onda que sirvió para confeccionarla y del ángulo entre los haces de referencia y objeto (procedente de la abertura en la matriz) que la iluminan. Si queremos emplear un láser de helio-neón (0,63 micrometros de longitud de onda) para producir una separación entre líneas del orden de 0,78 micrometros, el ángulo entre ambos haces debe ser de unos 54 grados.

Hobbs abordó, por último, la fuente luminosa que pudiera servir de haz reconstructor. Si la fuente fuese el Sol, el haz se compondría, con bastante aproximación, de ondas planas. Puesto que este haz se supone que es el conjugado del haz de referencia empleado para hacer la copia, el haz de referencia tendrá también que estar formado por ondas planas. Si la fuente fuese una lámpara común, el haz reconstructor se compondría de rayos divergentes, cuyo conjugado es un haz convergente y, por ello, el haz de referencia tendría que constituirse asimismo con rayos convergentes.

En *Holography Handbook* pueden encontrarse numerosas sugerencias acerca de la confección de hologramas de arco iris. Entre ellas se cuenta un procedimiento para concentrar la luz que atraviesa la abertura de la matriz mediante una lente cilíndrica hecha de un tubo de ensayo relleno de glicerina. Con esta lente, se prescinde incluso de la matriz, ya que puede enfocar directamente sobre la copia una imagen real y estrecha del objeto.



11. Aquí aparecen las imágenes coloreadas

Libros

Ciencia española, Lamarck, entomología médica y veterinaria y fluidos cósmicos

J. M. López Piñero, L. Alonso, M. Cordero del Campillo y J. Isern

ARNALDI DE VILLANOVA OPERA MEDICA OMNIA. XV. *Commentum supra tractatum Galieni de malicia complexionis diverse* (edición, introducción y comentarios por Luis García Ballester y Eustaquio Sánchez Salor). *Doctrina Galieni de interioribus* (edición, introducción y comentarios de Richard J. Durling). Barcelona, Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona, 1985. XI + 391 págs. La lectura de este nuevo volumen de las *Arnaldi de Villanova Opera Medica Omnia,* sin duda una de las contribuciones más importantes aparecidas hace tiempo en nuestro país a la investigación historicomédica de carácter *básico,* obliga a replantearse seriamente algunas cuestiones de fondo relativas a la situación actual del cultivo de nuestra disciplina. Quizá la más importante sea la tocante a la relación entre el consumo de estudios historicomédicos y la investigación básica, uno de cuyos núcleos fundamentales continúa siendo la edición crítica de textos clásicos. En líneas generales, puede afirmarse que dicha relación no funciona de modo satisfactorio. La literatura historicomédica de consumo en todos sus niveles —desde la destinada a la docencia universitaria hasta la más modesta divulgación— tiende con escasas excepciones a ofrecer información cada vez más empobrecida y de segunda mano, debido a su distanciamiento de la investigación actual y a su ignorancia de la realizada en épocas anteriores. Por la especial responsabilidad derivada de su gran difusión, hay que denunciar con particular dureza la degradación de la mayoría de las síntesis circulantes en inglés, redactadas por autores incapaces, no ya de leer fuentes en idiomas clásicos, sino de consultar fuentes o estudios en el resto de las lenguas modernas. La impermeabilidad característica del imperialismo cultural angloamericano ha agravado la situación, pero resultaría desorientador no recordar sus auténticas raíces.

La disociación entre la investigación y el consumo de la investigación historicomédica se inició en la segunda mitad del siglo XIX, al consolidarse plenamente el proceso llamado *obsolescencia* por los documentalistas, es decir, la acelerada tendencia a que la información médica envejezca y caiga en desuso. Este proceso acabó con el uso, habitual hasta entonces, de los textos clásicos como ''medicina viva'' y condujo a cuestionar el interés de los estudios historicomédicos, al menos para la propia medicina. Como ejemplo significativo, recuérdese lo sucedido a Charles Daremberg, uno de los grandes estudiosos de textos médicos clásicos. Mientras enseñó historia de la medicina en el Collège de France, el tono de "alta cultura" propio de esta institución constituyó el marco adecuado para sus lecciones, que se desarrollaron con notable éxito. En cambio, cuando ocupó la cátedra de la Facultad de Medicina, fue completo su fracaso como profesor.

Las únicas opciones que nuestra disciplina parecía tener para ocupar un lugar dentro del mundo médico eran el planteamiento "genético" del internista Wunderlich y otros todavía menos exigentes. Todos ellos reducían los datos del pasado a meros "precedentes" de los saberes y las prácticas del presente, tomados como términos absolutos de referencia. Por otra parte, eliminaban la necesidad de técnicas específicas de investigación. Según un testimonio de la época, el fracaso de Daremberg como profesor de la Facultad de París se debió a que, "poco inclinado a la vulgarización", se comportó de forma demasiado prolija en todos los detalles de la erudición pura, y estos defectos, que en cualquier otra ocasión hubieran sido cualidades inapreciables, alejaron de su aula de profesor un gran número de alumnos. Para que resultara aceptable por los médicos, nuestra disciplina tenía que renunciar a los "detalles de la erudición pura", es decir, a los datos procedentes de técnicas especializadas de investigación. Para cultivar una de las llamadas ciencias médicas básicas o cualquier especialidad clínica, los médicos se sentían obligados a adquirir una compleja preparación técnica. Por el contrario, para acercarse a la historia de la medicina, una gran mayoría parecía creer que bastaba con proponérselo y tener un poco de sentido común. Dicha actitud ha conducido, no sólo al predominio de una literatura de consumo procedente del peor diletantismo, sino a que las investigaciones historicomédicas realizadas con técnicas especializadas se desconecten del mundo de la medicina. Un ejemplo extremo de este último fenómeno fue la preparación a partir de 1901 del *Corpus Medicorum Graecorum,* empresa planificada por filólogos con exclusión completa de los médicos y destinada a los filólogos.

Desde su aparición hace once años, las *Arnaldi de Villanova Opera Medica Omnia* que dirigen Luis García Ballester, Juan Antonio Paniagua y Michael R. McVaugh se han opuesto frontalmente a la disociación que estamos comentando. El presente volumen confirma de modo inequívoco su orientación destinada a integrar las más rigurosas exigencias de la edición crítica de un texto clásico, con el análisis de su contenido y el debate de los temas médicos que plantea desde una perspectiva científica, intelectual y social. El núcleo de este volumen está constituido por la edición crítica de dos obras arnaldianas. Una de ellas es el *Commentum supra tractatum Galieni de malicia complexionis diverse,* comentario a la versión arábigo-latina del libro de Galeno *De inaequali intemperie.* La edición, a cargo de Luis García Ballester y Eustaquio Sánchez Valor, colaciona el manuscrito conservado en el Merton College, de Oxford —que era el único conocido— con otro descubierto por García Ballester en la Biblioteca Vaticana y tiene también en cuenta la primera edición impresa de las obras de Arnau. Lleva tres amplios

estudios introductorios destinados a las siguientes tareas: (1) situar este texto y el otro incluido en el volumen en el Montpellier del siglo XIII; (2) estudiar la forma lingüística y literaria y la técnica de exposición del *Commentum;* (3) analizar su contenido.

El primero de dichos estudios ofrece la exposición actualizada de la que, en mi opinión, constituye una de las más sobresalientes aportaciones que García Ballester ha realizado al conocimiento de la ciencia y la enseñanza médicas bajomedievales: la introducción del "nuevo Galeno" en el Montpellier de finales del siglo XIII y comienzos del XIV. Esta expresión designa un conjunto de treinta y tantas obras del autor de Pérgamo de tema fisiológico, patológico, clínico y terapéutico, transmitidas a través de versiones arábigo-latinas procedentes en su mayoría de Toledo, con adiciones posteriores de otros traductores, entre los que figuró el propio Arnau. El estudio aclara el papel desempeñado por dicha introducción desde diferentes puntos de vista, siendo quizás el más sugestivo su peso en el debate mantenido en la época entre los "empíricos" y los partidarios de hacer de la medicina una técnica fundada racionalmente. La sitúa también históricamente entre la tradición médica anterior de la escuela, centrada en la *Articella,* y la hegemonía posterior de la versión arábigo-latina del *Canon,* de Avicena. Se trata de un eslabón de auténtica importancia para entender la trayectoria de la medicina galénico-tradicional, que a partir de ahora resulta obligado incorporar a los trabajos de síntesis, por muy sumarios que sean, y a los esquemas didácticos.

El segundo de los capítulos introductorios incluye, por una parte, un estudio de Sánchez Valor que es el primer análisis de la lengua académica utilizada por Arnau como profesor; por otra, un apartado sobre "la técnica del comentario" con iluminadoras puntualizaciones sobre las formas e instrumentos escolásticos. Por último, el tercer estudio se ocupa de las ideas médicas expuestas en el *Commentum.* Sobre la base general del concepto de *complexio,* se examina la clínica de la inflamación, la relación entre clínica y morfología y la interpretación de la fiebre. Personalmente, sólo puedo decir que este último estudio me ha llevado a introducir numerosas rectificaciones en mi acercamiento a las concepciones de Francisco Valles acerca de estos temas. Me imagino que algo parecido puede sucederle a otros estudiosos del galenismo de los siglos XVI y XVII, obligados como yo a enfrentarse con cuestiones de detalle sin disponer de estudios rigurosos de las correspondientes raíces bajomedievales.

El otro texto incluido en este volumen es el titulado *Doctrina Galieni de interioribus,* obra inédita cuya paternidad arnaldiana ha sido demostrada por McVaugh. Es una reelaboración de los dos primeros libros del tratado galénico *De locis affectis,* que Arnau realizó a partir de la versión arábigo-latina. No hace falta destacar el relieve de dicho tratado en la historia de la patología. Se ha encargado de su edición crítica Richard J. Durling, autoridad bien conocida como especialista en el *Galenus latinus.*

La solapa de la cubierta anuncia la próxima aparición de otros ocho volúmenes a cargo de los directores de estas *Opera Omnia* y de otros prestigiosos historiadores de la medicina y filólogos. Confiemos que los problemas económicos, que siempre acompañan a empresas de esta categoría, no dificulten la continuidad de la serie. Deseemos incluso que sea posible ofrecer en el futuro versiones de los textos arnaldianos a idiomas modernos, con lo que la accesibilidad de su obra sería completa, tal como dice García Ballester en el prólogo de este tomo. (J.M.L.P.)

FILOSOFÍA ZOOLÓGICA, de Jean Baptiste de Monet, Caballero de Lamarck. Altafulla-Fontalba; Barcelona, 1986. Los vicios que reseña López Piñero en la crítica anterior se compendian en este volumen, en el que dormita el diccionario, chirría la sintaxis y la lógica vagabundea. Para centrar al lector: se le ofrece la *Filosofía zoológica* de Juan Lamarck, traducida por José González Llana, que publicó F. Sempere a comienzos de la segunda década de nuestro siglo, con prólogo de Ernesto Haeckel. El libro que aquí vamos a comentar contiene el facsímil de dicha edición presentado por Adrià Casinos y cerrado con un "apéndice" que incluye la *Advertencia* y el primer párrafo del *Discurso preliminar* de la *Philosophie zoologique,* de Lamarck, traducidos por "Jaume Serrasolsas".

"Un siglo (año más, año menos) tuvo que esperar la *Philosophie zoologique* de Lamarck a ser traducida al castellano. Se trata de la edición que nos ocupa." (p. XIV). Dicho así, sin mayores precisiones, eso es falso. La edición de Sempere no es la traducción de la obra en cuestión de Lamarck, sino sólo la de su primera parte, e incompleta. *Philospohie zoologique* apareció en París, en 1809, en dos tomos; *Filosofía zoológica* corresponde sólo a las 357 páginas primeras del primer tomo, y no enteras. Repetir varias veces que ésta es la obra de Lamarck y silenciar qué cubre, con podas desde el mismo subtítulo, es impresentable en historiografía, además de dar pie a engaño al confiado comprador. Usar un potencial "se trataría de una traducción castellana de la versión que, en 1907, publicó 'Schleicher frères'", sin agregar si es abreviada, aumentada, corregida, puesta al día, extractada o estropeada, y por quién, no aclara nada.

Trece páginas (V-XVII) ocupa la presentación de Casinos, que lleva por epígrafe general "Lamarck, entre el olvido y la confusión". Si el lector no quiere quedar confundido, olvídelas. No piense encontrar un desarrollo cronológico más o menos vertebrado de sus ideas en el campo de la botánica –aquí se ignora su colaboración con A.-P. De Candolle, entre otras graves omisiones–, de la química, de la antropología e incluso de la misma zoología. Los escritos —los zoológicos, sobre todo– se amontonan como si fueran listas de reyes, sin juicio crítico del contenido, sin la descripción somera de su índice. Y aunque de una filosofía del mundo animal se trata, una filosofía de la ciencia escribía Lamarck, no aparecen los autores que llenaban sus estanterías ni la deuda contraída con Descartes, Locke y otros. Para Casinos, Rousseau se basta.

A falta de razones, buenas son las emociones. Se destaca su entusiasmo 'por la revolución'; se habla del 'ateísmo solapado' de Buffon, de la 'ideología antirrevolucionaria' de Lavoisier, del Cuvier 'reaccionario'; del juicio de Engels, un pensador 'revolucionario', sobre la teoría de las catástrofes de Cuvier, 'revolucionaria en sus palabras, pero reaccionaria en sus hechos'...

La explicación que se da del transformismo lamarckiano evidencia una lectura apresurada de las páginas dedicadas a los mecanismos del cambio evolutivo en Lamarck por Ernst Mayr en su *The Growth of Biological Thought.* Hay que acudir a ellas para entender a qué viene lo de la volición en la relación uso-herencia. Como habrá que consultar las páginas de *Nature* y *Science* de los años 1980-1984 si nos interesa la *nueva* síntesis, el cladismo, el neolamarckismo y el equilibrio punteado; amén, por supuesto, de los libros y otros artículos originales de los exponentes principales.

Se da por "globalmente correcta" la traducción de González Llana. Así no

se está obligado a reconocer que falta texto en las páginas XIV, XV, XVI, XIX, XX, XXIII, etcétera, en aquellos fragmentos de la Introducción que se han supuesto enteros; ni que hay errores que entorpecen la lectura: antología por analogía, naturalmente por necesariamente, facultades por necesidades, etcétera; ni que la división de párrafos a veces se aleja de la original, como también se suprimen a discreción numeraciones y cursivas.

La traducción del Apéndice ha corrido a cargo de "Jaume Serrasolsas", corresponsable de la edición. Con tener delante el capítulo octavo ("La notion d'organisation chez Lamarck") del libro de J. Schiller titulado *La notion d'organisation dans l'histoire de la biologie*, se habría evitado sustituir en más de una ocasión organización por organismo. Tampoco lo habitual es equiparable a permanente, ni singular a sencillo, ni un sistema de organización es un sistema de orden, ni lo positivo es lo más avanzado, ni la cantidad es la cualidad, ni las particularidades las facultades... ¿para qué seguir? Faltan líneas en la página [251] (seis del original francés de la primera edición, que es la que me sirve de referencia), otra más abajo en esa misma página, en la [255], en la [256] (aquí la tijera ha suprimido trece), en la [258], etcétera.

Un trabajo serio de historia de la ciencia debe prestar especial atención al uso exacto de los términos y a la delimitación de su campo semántico. Nos hemos referido a la palabra *organización*, preñada de sentido filosófico y biológico. Otra noción pareja y familiar en la historia de las ideas biológicas es la de *composition*. González Llana la traduce con el castizo "composición"; "Jaume Serrasolsas" utiliza "complejidad". Era obligado justificar la razón de ese dispar uso en un mismo libro, como lo era explicar por qué se vuelve atrás en un texto de especial interés hermenéutico. Dice Lamarck: "...l'organisation se compose et même se complique graduellement, dans sa composition, d'une manière extrêmement remarquable?" (*Philosophie zoologique*; Avertissement, iii.). Traduce "Jaume Serrasolsas": "¿... la organización se hace gradualmente más compleja, en su composición, de una forma extraordinariamente destacable?". La finta se ha llevado por delante una de las ideas maestras de Lamarck: "l'organisation se compose".

El azar ha querido que esta reseña apareciera al lado de un tratado modélico de historia del pensamiento médico. Es el gato y la liebre de la sabiduría popular. La historia de la biología no debe tratarse como una tarea menor; en el campo del saber no hay rangos: las cosas se saben o se ignoran. López Piñero ha trazado las coordenadas de lo que debe ser el profesional. ¿Qué menos que conocer los métodos y las herramientas? Hasta para traducir un fragmento de Lamarck, hemos visto, se necesita tener un bagaje filosófico y lingüístico que no se cubre con el mero conocimiento del francés, sino que exige adentrarse en el latín que le da soporte y en la arqueología de los conceptos. En cualquier universidad europea, la presentación y la traducción incorporada se hubieran desechado. Compare el lector lo aquí ofrecido con los trabajos introductorios a la edición inglesa de esa misma obra de Lamarck realizados por Richard W. Burkhardt, Jr., y David L. Hull (*Zoological Philosophy,* 1984). Burkhardt es voz autorizada con un abultado elenco de publicaciones sobre el lamarckismo. No busquen su nombre en la bibliografía citada en la versión española. A quien le interese una aproximación esquemática a Lamarck y su obra, me permitiría recomendarle el librito *Lamarck* de L. J. Jordanova, publicado por Oxford University Press en 1984. Desde el punto de vista de la filosofía de la biología sigue siendo obligada referencia la monografía de E. Gilson *De Aristóteles a Darwin*. (L.A.)

MEDICAL AND VETERINARY ENTOMOLOGY, por D. S. Kettle. Croom Helm; Londres, 1984. Dado que el autor no se ha decidido titular su obra *Artropodología* médica y veterinaria, se ve en la precisión de indicar que emplea el término *Entomología*, no en sentido taxonómico, sino con la amplitud que es habitual en muchas obras médicas y veterinarias. Efectivamente, no sólo se estudian insectos, sino que se describen otros grupos de artrópodos que tienen interés por su papel patógeno directo o por intervenir como vectores u hospedadores intermediarios. Tal es el caso de ácaros, crustáceos, quilópodos, diplópodos y arácnidos.

Es difícil establecer, en el amplísimo campo de los artrópodos de interés médico, las prioridades para la exposición y cuándo ha de fijarse una extensión forzosamente limitada a la obra. De otro lado, conocer profundamente los aspectos zoológicos de la artropodología y, al mismo tiempo, los médicos y veterinarios es empresa que supera ampliamente la capacidad de un autor. Forzosamente, uno de los aspectos ha de predominar y, en la obra que comentamos, el zoológico priva sobre el médico. El autor lo explica satisfactoriamente en la "Introducción", al indicar que renuncia a ocuparse de los aspectos relativos a clínica, lesiones, diagnóstico, tratamiento y métodos de control y erradicación. Lo confirma cuando señala que el entomólogo, en sentido lato, es un componente más del equipo médico o veterinario, a la hora de luchar contra los artrópodos nocivos, a fin de reducir su prevalencia e incidencia en las poblaciones, considerando los aspectos ecológicos totales del área en cuestión.

Resulta así un manual en el que médicos y veterinarios tienen mucho que aprender de los aspectos relativos a la etiología y epidemiología de las artropodosis, en la misma medida que los entomólogos-acarólogos tienen la oportunidad de mejorar sus conocimientos estudiando obras escritas desde la perspectiva médico-veterinaria. Ciertamente, la obra aporta información en aquellas cuestiones que reciben un tratamiento más endeble en los clásicos tratados de patología médica o veterinaria.

Está estructurada la obra en tres partes. La primera define los propósitos del autor, sitúa en la sistemática a los agentes y analiza con particular detalle la clasificación y estructura de los insectos, al tiempo que introduce importante información sobre el problema de la especie en entomología.

La parte segunda, la más amplia, se dedica a los Dípteros, tomando como base 14 familias de los mismos, más Siphonaptera, Hemiptera y Phthiraptera. Se ocupa después de los ácaros de interés (Astigmata, Oribatida, Prostigmata, Gamasida, Argasidae e Ixodidae). De acuerdo con la importacia de cada grupo, los trata en general, o bien pormenoriza con suficiente detalle. De los mosquitos, por ejemplo, se estudia su ciclo, bionomía general, hábitos de cópula, búsqueda y elección de hospedador, frecuencia de la picadura, papel de la ingesta de sangre en el desarrollo de los ovarios, oviposición, selección de los lugares de cría, métodos de dispersión y amplitud del vuelo, hibernación y ciclos estacionales, distribución geográfica e importancia económica, médica y veterinaria.

En la parte tercera se analiza el papel de los artrópodos como vectores u hospedadores intermediarios de virus, rickettsias, bacterias, protozoos, nemátodos y otros helmintos.

Cada uno de los diversos epígrafes en que se desglosan las diversas partes lleva un apéndice bibliográfico. La obra concluye con un índice de materias. Las ilustraciones, no siempre de

perfecta reproducción, resultan suficientemente demostrativas, en particular los diagramas en que se rotulan las diversas estructuras anatómicas de interés diferencial. El papel y la impresión son adecuados para la lectura, aunque existen diversas erratas (Argadisae, en el índice general; empleo de negritas o itálicas un tanto arbitrariamente en algunos epígrafes). Algunos términos pueden corregirse; así, *Loiasis* debe decir *Loaiasis* o, mejor todavía, *Loaosis* (pág. 619).

En cuanto a la bibliografía seleccionada, no sorprende que sea predominantemente de lengua inglesa, pero sí extraña que apenas se mencionen trabajos en francés, alemán y, naturalmente, en ruso; ninguno aparece en español. Algunos datos sobre *Babesia* y *Theileria* hubieran podido completarse simplemente conociendo el manual de Boch y Supperer *Veterinärmedizinische Parasitologie* (P. Parey, 1983). Un capítulo sobre métodos de lucha hubiera completado adecuadamente la obra.

Estas pequeñas matizaciones no invalidan el gran valor que tiene el libro para médicos y veterinarios, como complemento de su formación patológica, generalmente circunscrita al tratamiento médico, con escaso énfasis en los aspectos relativos a la historia natural de la enfermedad. (M.C.).

Fluidos Cósmicos, por Eduardo Battaner. Editorial Labor; Barcelona, 1986. Bajo el título *Fluidos cósmicos* se esconde un libro sumamente útil para estudiantes e investigadores interesados en el campo de la astrofísica que viene a paliar la escasez de textos científicos en lengua castellana. En esta materia, esencialmente pluridisciplinaria, caben todas las ramas de la física y, entre ellas, la dinámica de fluidos y la mecánica estadística ocupan un lugar destacado. El autor ha preferido desarrollar las leyes básicas de estas dos ramas científicas y presentar las cuestiones astrofísicas como una consecuencia de tales leyes, en vez de proceder a una extensa yuxtaposición de objetos astronómicos y sus propiedades. Partiendo de este enfoque, Battaner ha construido un libro riguroso y ameno en el que las propiedades de los fluidos constituyen el hilo que permite orientarse en el laberinto formado por los objetos celestes y sus propiedades, poniendo de relieve su coherencia interna.

El primer capítulo está dedicado a la teoría del transporte para un sistema de partículas clásicas no cargadas eléctricamente. En él se introducen las definiciones y las ecuaciones básicas (ecuación de Boltzman, ecuaciones de conservación, etc.) imprescindibles para el posterior desarrollo del libro, así como un tratamiento elemental de la difusión, la viscosidad y la turbulencia. El contenido de este último tema se caracteriza por su sencillez y concisión.

La dinámica de los sistemas estelares es el objeto del segundo capítulo. En él las estrellas son consideradas como simples partículas que giran alrededor del centro galáctico y que experimentan una atracción gravitatoria mutua. El enfoque, muy simplificado, es correcto y pedagógico, por lo que se hace recomendable como texto introductorio al tema; los casos particulares escogidos de ejemplos, atinados. Probablemente hubiera sido conveniente presentar la fenomenología astronómica con algo más de detalle, pues algunos de sus problemas son temas punteros de la astrofísica moderna. En este sentido, hubiera sido deseable un estudio más extenso de la dinámica de los cúmulos estelares, especialmente en lo que se refiere a la difusión de estrellas masivas hacia el centro del cúmulo, colisiones de baja energía y otros.

El tercer capítulo estudia el transporte de fotones. Siguiendo la pauta general del libro, el autor introduce las definiciones pertinentes y pasa a exponer algunas de las aplicaciones más importantes en astrofísica. Aunque el capítulo se ciñe a problemas y casos clásicos, bastante conocidos, el enfoque aquí utilizado permite una rápida comprensión de los mismos. (Basta recordar las dificultades que suelen encontrar los alumnos para entender el concepto de intensidad de radiación.) El capítulo contiene, además, sendos apartados sobre la formación de rayas espectrales y los efectos de la radiación sobre un fluido en movimiento. La extensión que le merecen me parece insuficiente. En el primero echo a faltar una descripción de cómo utilizar las rayas espectrales para diagnosticar las condiciones físicas de un plasma (densidad, temperatura y composición química), así como las modificaciones que hay que introducir para abordar los casos en que no hay equilibrio termodinámico. El segundo se ciñe a las modificaciones introducidas por la radiación en las propiedades del fluido, sin explayarse en la forma cómo deben plantearse las ecuaciones del transporte radiativo de un fluido en movimiento. Es posible que ambos temas estén fuera del alcance y la extensión de un libro como el que se está comentando.

En el capítulo IV se describe el transporte en plasmas, para preparar el camino a la investigación de las propiedades del gas que impregna las galaxias. Empieza con una presentación de las ecuaciones de Maxwell y con la definición de plasma entendido como medio en el que se producen fenómenos colectivos. A continuación, se plantean las ecuaciones de conservación (continuidad, ley de Ohm, conservación de la energía y del momento) y los efectos producidos por la presencia de electrones e iones en el plasma (difusión ambipolar). El capítulo se cierra con las ecuaciones de la magnetohidrodinámica, su reducción al caso estático y una breve exposición de las ondas de Alfvén. El capítulo quinto, sobre las propiedades del gas galáctico, es el más completo de los siete que componen el libro. Ello se debe, sin duda, a que dicho tema constituye uno de los puntos mejor conocidos por el autor. Tras presentar las ecuaciones que gobiernan el gas interestelar, introduce el teorema del virial para el caso de un gas magnetizado. Este teorema, junto con la exposición de la naturaleza de las ondas de Jeans, le permite exponer los problemas básicos que plantea el colapso de las nubes interestelares. Finalmente, después de una breve descripción de la evolución química de la galaxia, se nos ofrece la distribución del gas galáctico bajo condiciones estacionarias.

El capítulo VI consta de dos partes. En la primera se deducen las ecuaciones fundamentales de las estrellas normales y se presentan las relaciones dimensionales que obedecen las estructuras estelares, poniendo especial énfasis en la relación masa-luminosidad. En la segunda parte se exponen las propiedades de las estadísticas cuánticas y se infieren las ecuaciones de estado de un gas ideal de Fermi completamente degenerado en los límites newtonianos y completamente relativista. Estas ecuaciones se utilizan luego para explicar el comportamiento de las enanas blancas y de las estrellas de neutrones, así como para mostrar la existencia de la masa límite de Chandrasekhar. El capítulo VII, dedicado al Sistema Solar, esboza las propiedades de la materia interplanetaria, del viento solar, de los interiores planetarios y de sus atmósferas.

La estructura general de la obra, altamente pedagógica, facilita su empleo como manual. Se trata de un libro de gran calidad, sencillo y directo que presenta la astrofísica bajo un punto de vista muy distinto de los compendios al uso y que, dada la escasez de referencias en lengua castellana, debería haber sido más extenso. (J.I.).

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL PROBLEMA DE LAS MICROONDAS

The Origins of U.S. Safety Standards for Microwave Radiation. Nicholas H. Steneck, Harold J. Cook, Arthur J. Vander y Gordon L. Kane en *Science*, vol. 208, n.° 4449, págs. 1230-1237; 13 de junio de 1980.

Effects of Long-Term Low-Level Radiofrequency Radiation Exposure on Rats. A. W. Guy et al. U.S.A.F. School of Aerospace Medicine, 1983-85.

Radiofrequency Radiation Exposure Limits in Eastern Europe. Peter Czerski en *Journal of Microwave Power*, vol. 20, n.° 4, págs. 233-239, 1985.

Biological Effects and Exposure Criteria for Radiofrequency Electromagnetic Fields. National Council on Radiation Protection and Measurements, Report n.° 86, Bethesda, Md., 1986.

DE LA TOPOLOGIA A LA QUIMICA

Molecular Connectivity in Chemistry and Drug Research. Lamont B. Kier y Lowell H. Hall. Academic Press, 1976.

Chemical Graph Theory. Nenad Trinajstić. CRC Press, 1983.

Information-theoretic Indices for Characterization of Chemical Structures. Danail Bonchev. Research Studies Press, distribuido por John Wiley & Sons, Inc., 1983.

SUPERCUERDAS

An Introduction to the Theory of Dual Models and Strings. J. Scherk en *Reviews of Modern Physics*, vol. 47, n.° 1, págs. 123-164; enero, 1975.

Unification of Forces and Particles in Superstring Theories. Michael B. Green en *Nature*, vol. 314, n.° 6010, págs. 409-414; 4 de abril de 1985.

Superstrings and Supersymmetry. Alvaro de Rújula en *Nature*, vol. 320, n.° 6064, pág. 678; 24 de abril de 1986.

Superstring Theory. M. B. Green, J. H. Schwarz y E. Witten. Cambridge University Press. En prensa.

LA BARRERA HEMATOENCEFALICA

Polarity of the Blood-Brain Barrier: Distribution of Enzymes between the Luminal and Antiluminal Membranes of Brain Capillary Endothelial Cells. A. Lorris Betz, J. Anthony Firth y Gary W. Goldstein en *Brain Research*, vol. 192, número 1, págs. 17-28; 16 de junio de 1980.

Brain Metabolism: A Perspective from the Blood-Brain Barrier. William M. Pardridge en *Physiological Reviews*, vol. 63, n.° 4, págs. 1481-1535; octubre, 1983.

Specialized Properties and Solute Transport in Brain Capillaries. A. Lorris Betz y Gary W. Goldstein en *Annual Review of Physiology*, vol. 48, págs. 241-250; 1986.

EL COLOR DE LOS OBJETOS

Treatise on Physiological Optics. Herman von Helmholtz. Dover Publications, Inc., 1962.

The Ferrier Lecture, 1962: Visual Adaptation. W. A. H. Rushton en *Proceedings of the Royal Society, Series B*, vol. 162, n.° 986, págs. 20-46; 16 de marzo de 1965.

Daylight and Its Spectrum. S. T. Henderson. John Wiley & Sons, Inc., 1977.

La Teoría Retinex de la Visión del Color. Edwin H. Land en *Investigación y Ciencia*, n.° 17, págs. 64-81; febrero, 1978.

LA FIABILIDAD DE LA CIENCIA

Temas y Problemas de Filosofía de la Física. Evandro Agazzi. Editorial Herder; Barcelona, 1978.

La Fiabilidad de la Ciencia Experimental. Mariano Artigas en *Sapientia*, vol. 36, n.° 140, págs. 117-128; abril-junio 1981.

Progreso y Racionalidad en la Ciencia. Dirigido por Gerard Radnitzky y Gunnar Andersson. Alianza Editorial; Madrid, 1982.

Estructura y Desarrollo de la Ciencia. Dirigido por Gerard Radnitzky y Gunnar Andersson. Alianza Editorial; Madrid, 1984.

Commensurability, Incommensurability, and Cumulativity in Scientific Knowledge. Evandro Agazzi en *Erkenntnis*, volumen 22, páginas 51-77; 1985.

La Nature de la Verite Scientifique. Colloque de l'Académie Internationale de Philosophie des Sciences de Bruxelles. Ciaco, Louvain-la-Neuve 1986.

BRAQUIOPODOS

Permian Brachiopods of West Texas. G. Arthur Cooper y Richard E. Grant. Smithsonian Institution Press, distribuido por la Oficina de Publicaciones del Gobierno de los Estados Unidos, 1972-77.

Brachiopods and Pedicles. Joyce R. Richardson en *Paleobiology*, vol. 7, n.° 1, págs. 87-95; 1981.

Brachiopods. Merrill W. Foster en *Synopsis and Classification of Living Organisms*, dirigido por Sybil P. Parker. McGraw-Hill, 1982.

End-Cretaceous Brachiopod Extinctions in the Chalk of Denmark. Finn Surlyk y Marianne Bagge Johansen en *Science*, vol. 223, n.° 4641, págs. 1174-1177; 1984.

CONTRIBUCION DE LEONARDO A LA MECANICA TEORICA

The Mechanical Investigations of Leonardo da Vinci. Ivor B. Hart. University of California Press, 1963.

The Mechanics of Leonardo da Vinci. Clifford A. Truesdell en *Essays in the History of Mechanics*. Springer-Verlag, 1968.

Leonardo da Vinci. Mechanics. Marshall Clagett en *The Dictionary of Scientific Biography: vol. 8*, dirigido por Charles Coulston Gillispie. Charles Scribner's Sons, 1973.

JUEGOS DE ORDENADOR

Mathematical Games. Martin Gardner in *Scientific American*, vol. 224, n.° 2, págs. 112-117; febrero, 1971.

Juegos de Ordenador. Brian Hayes en *Investigación y Ciencia*, n.° 87, págs. 118-125; diciembre, 1983.

TALLER Y LABORATORIO

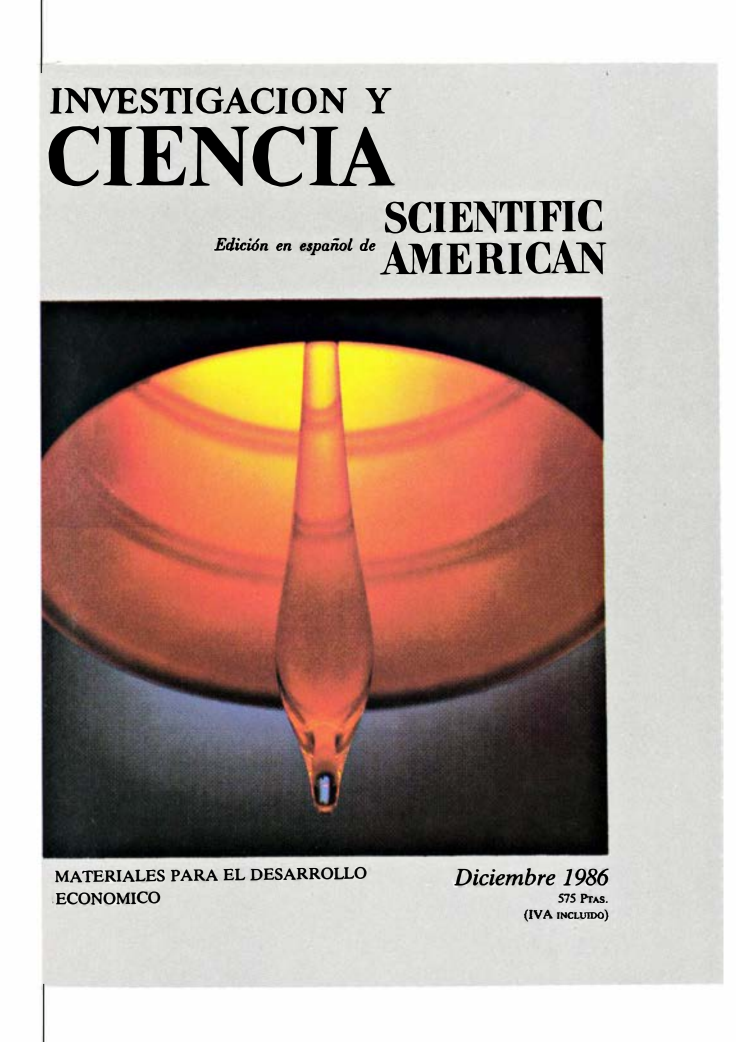
Holography Handbook: Making Holograms the Easy Way. Fred Unterseher, Jeannene Hansen y Bob Schlesinger. Ross Books, 1982.

Seeing the Light: Optics in Nature, Photography, Color, Vision, and Holography. David Falk, Dieter Brill y David Stork. Harper & Row, Publishers, 1986.

Número extraordinario y monográfico de diciembre

MATERIALES PARA EL DESARROLLO ECONOMICO

Ingenieros, metalúrgicos, químicos, físicos y técnicos de estado sólido y comunicaciones exponen los últimos avances de la ciencia de los materiales, que ellos mismos han propiciado



ARTICULOS

- **Nuevos materiales y economía**
- **Materiales para la información y la comunicación**
- **Materiales para el espacio**
- **Materiales para el transporte terrestre**
- **Materiales para el empleo de la energía**
- **Materiales para la medicina**
- **La ciencia de los materiales**
- **Materiales electrónicos y magnéticos**
- **Materiales fotónicos**
- **Nuevos metales**
- **Nuevas cerámicas**
- **Nuevos polímeros**
- **Materiales híbridos**

El ser humano se ha liberado de la tiranía de los recursos naturalmente disponibles gracias a una mezcla de física, química, metalurgia y matemáticas. El conocimiento de los procesos físicos que subyacen a la formación de los enlaces químicos, que controlan el ensamblaje de una red cristalina y describen lo que sucede en la superficie de los cuerpos, permite a los investigadores construir materiales destinados a cumplir funciones específicas.

INVESTIGACION Y CIENCIA

expone la amplia gama de herramientas refinadas que ofrece la tecnología contemporánea, entre las que se cuentan la microscopía electrónica, la implantación de iones y los procesos epitaxiales de haces moleculares.